

チタン酸バリウム駆動縦振動音片に関する研究*

近 野 正

工 学 部 電 気 工 学 科

目 次

§§ 1	チタバリ縦振動音片の構造
§§ 2	チタバリ縦振動音片に関する機械振動子としての理論的考察
§§ 3	チタバリ縦振動音片の電気・機械定数について（電気音響変換器としての理論的考察）
§§ 4	チタバリ縦振動音片の電氣的等価四端子網
§§ 5	チタバリ縦振動音片発振器について
§§ 6	圧電駆動型と電磁駆動型の比較
結 言	
附 録	
§ A1	縦振動変形音片の等価諸定数値

緒 言

水晶を鋼棒に接着し縦振動させた例は既に 1922, Cady によって試みられて居り、またロッシェル塩接着の横振動・縦振動棒については抜山教授をはじめその門下生により多くの研究が行われて来たが耐湿性、機械的強度、温度特性等の点に於て信頼性が低く、標準振動子としては使用されなかった。筆者も 1950 年頃ロッシェル塩圧電駆動型横振動音片について諸実験を試みたが上記の欠点のため不良の結果に終わった。最近チタン酸バリウム磁器 (BaTiO_3) に関する研究が活発となるに伴い再び圧電駆動による横振動、縦振動棒の研究も行われる様になり、横振動型チタバリ音片に関しては京大阿部・田中教授の実験結果が発表になっている。

本文はチタン酸バリウム駆動縦振動型音片（以下チタバリ縦音片と呼称する）に関する理論的な考察と実験結果について述べるもので、チタバリ縦音片の振動を等価回路網の見地から検討し体系づけると共に簡易で安価な副標準振動子としての応用並びに圧電駆動型機械濾波器えの基礎を与える事を目的とする。

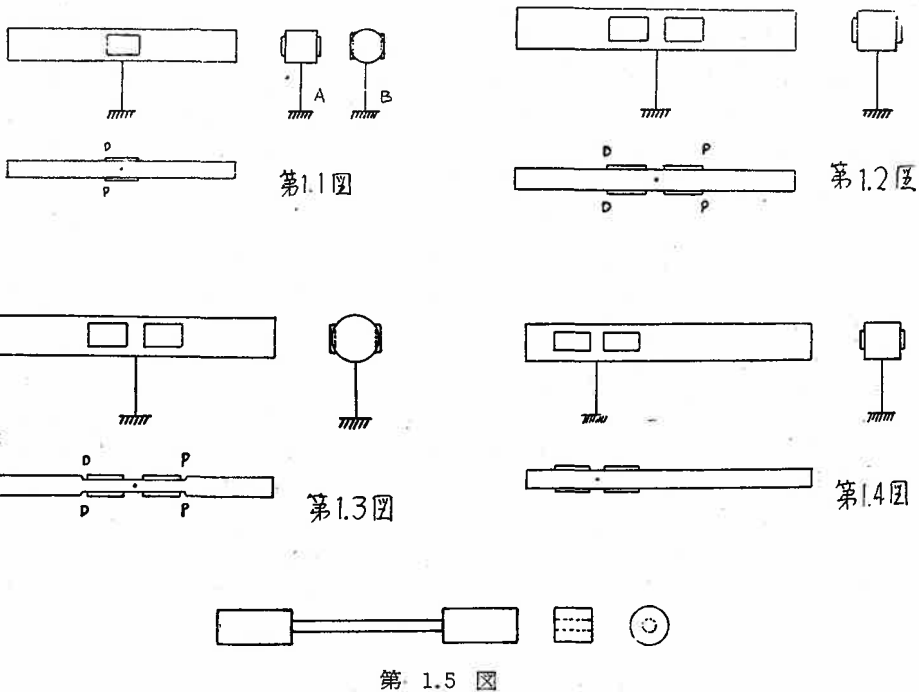
横振動型でも、縦振動型でも、その規準函数に注目する時は略々同考察の下に論を進める事が出来る。

* 本研究は文部省研究助成補助金（昭和30年度, No.53030）を受け、研究の一部は電気学会東北支部連合大会（昭30.10）に発表した。

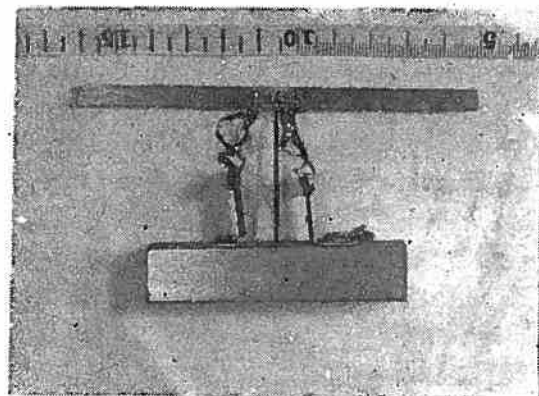
§§ 1 チタバリ縦音片の構造

本考察の対象とし、また実験に使用したチタバリ縦音片の略図を第1.1図乃至第1.4図に示す。 図中 D, P なる記号は夫々 Drive, Pick up を表す。

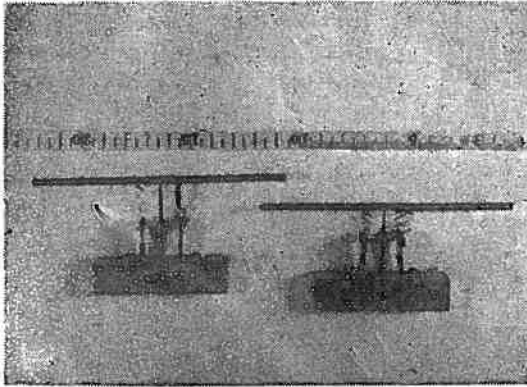
第1.1図 に示す 様な一側面駆動、一側面ピックアップの駆動方式では横振動(撓み)が起振され種々の弊害を生ずる。併乍らこの方式でも同調インダクタンスを挿入し共振を取る事により上記の撓み振動を軽減、防止する事が出来る。第1.2図 乃至 第1.4図 はチタバリ (BaTiO_3) を二分し二個一対を以て両側面で駆動、抽出するものでその理由は横振動の



防止に在る。第1.1図 の(B)及び第1.3図 は丸棒 の音片を使用した例であるが前者はチタバリを削り、後者は素地 音片の側面を削り接着を行っている点異なる。第1.4図 は高次振動チタバリ縦音片の例である。第1.5図 は変形縦振動音片の例である。第1.6図 は試作品の写真である。



第 1.6 図 (A)



第 1.6 図 (B)

BaTiO₃ の破壊時の張力は 111kg/cm², 接着強度 421kg/cm² となっている。BaTiO₃ 磁器の Q は精々 200 程度で, 接着剤も 相当に振動損失があるから一般にチタバリ音片の Q は素地音片のそれより低くなる。

(1) 中央部接着チタバリ縦音片

第 2.1 図 に示す様な 中央部接着チタバリ縦音片について考察する。貼付する BaTiO₃ は薄片であるからその振動姿態を素地音片の姿態, 即ち正弦波分布に等しいと仮定すると基本振動に対する変位 η は



第 2.1 図

$$\eta(x) = \eta_0 \cdot \sin \frac{x}{l_0} \pi,$$

$$\text{あるいは } \eta(x) = \eta_0 \cdot \sin \pi X, \quad X = x/l_0 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

となる。茲に長軸を x 軸とし, 中央原点とし, 両端振幅変位を η_0 とする。今, 密度, ヤング率, 断面積を夫々 ρ, E, S にて表し, サフィックス O, T を以て夫々素地音片・貼付チタバリを表すものとし各部のエネルギーを算出すると貼付チタバリの運動エネルギー T_T は

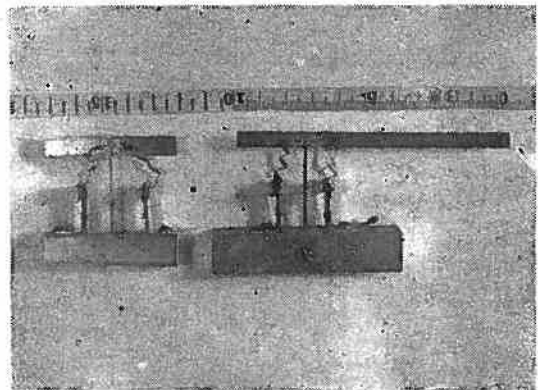
$$\begin{aligned} T_T &= \frac{1}{2} \rho_T S_T \omega^2 \int_{-l_T/2}^{l_T/2} \eta_O^2 dx = \frac{1}{2} \rho_T S_T \omega^2 \frac{\eta_0^2}{2} \left(l_T - \frac{l_0}{\pi} \sin \pi \frac{l_T}{l_0} \right) \\ &\equiv \frac{1}{2} m'_T \omega^2 \eta_0^2 \end{aligned}$$

① 阿部・田中(外), 電気三学会連大予, 昭26.5.

§§ 2 チタバリ縦振動音片の機械振動子としての理論的考察

§ 2.1 接着チタバリの皮相共振周波数, 皮相共振尖鋭度に及ぼす影響について

チタン酸バリウム磁器のみならず, 接着剤も音片の総合特性に影響を与えるが接着方法が良好な場合は寧ろ圧電材料の機械的強度を上回る接着強度を得ると報告されている。^① 因みに一例を挙げると



第 1.6 図 (C)

となるから、貼付チタペリの自由端に換算された等価質量 m'_T は

$$m'_T = \frac{1}{2} \rho_T S_T l_0 \left(\frac{l_T}{l_0} - \frac{1}{\pi} \sin \pi \frac{l_T}{l_0} \right) \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

の如く求められる。

一方位置エネルギー U_T は、自由端に換算された等価スチツフネスを s'_T とすると

$$\begin{aligned} U_T &= \frac{1}{2} E_T S_T \int_{-l_T/2}^{l_T/2} \left(\frac{\delta \eta}{\delta x} \right)^2 dx = \frac{1}{2} E_T S_T \left(\eta_0 \frac{\pi}{l_0} \right)^2 \frac{1}{2} \left(l_T + \frac{l_0}{\pi} \sin \pi \frac{l_T}{l_0} \right) \\ &\equiv \frac{1}{2} s'_T \eta_0^2 \end{aligned}$$

となるから

$$s'_T = \frac{\pi^2}{2} \frac{E_T S_T}{l_0} \eta_0^2 \left(\frac{l_T}{l_0} + \frac{1}{\pi} \sin \pi \frac{l_T}{l_0} \right) \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

を得る。

次に素地音片の、自由端に於ける等価質量 m_0 及び等価スチツフネス s_0 は同様にして

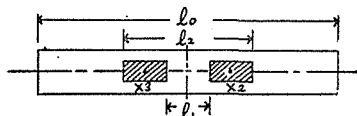
$$m_0 = \frac{1}{2} \rho_0 S_0 l_0, \quad s_0 = \frac{\pi^2}{2} \frac{E_0 S_0}{l_0}, \quad \omega_0 = 2\pi f_0 = \sqrt{\frac{s_0}{m_0}} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

の様に求められる。故に皮相共振周波数 f'_1 は

$$f'_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s_0 + s'_T}{m_0 + m'_T}} = \frac{1}{2l_0} \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} \sqrt{\frac{1 + \frac{E_T}{E_0} \frac{S_T}{S_0} \left(\frac{l_T}{l_0} + \frac{1}{\pi} \sin \frac{l_T}{l_0} \pi \right)}{1 + \frac{\rho_T}{\rho_0} \frac{S_T}{S_0} \left(\frac{l_T}{l_0} - \frac{1}{\pi} \sin \frac{l_T}{l_0} \pi \right)}} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

となる。

一例として $l_0 = 14$, $l_T = 1.0$, $S_0 = 0.5 \times 0.7 = 0.35$, $S_T = 0.5 \times 0.1 = 0.05$ (cm 単位) なるチタペリ縦音片の周波数変動率 $\Delta f/f_0$ を計算すると $E_T = 0.975 \times 10^{12}$ dyne/cm², $E_0 = 2.1 \times 10^{12}$, $\rho_T = 5.5$ g/cm³, $\rho_0 = 7.8$ とし $\Delta f/f_0 = +0.46\%$ を得る。即ち共振周波数は 0.46% 上昇する。(2.5) 式から貼付チタペリの断面比 $R_s (= S_T/S_0)$, 長さ比 $R_l (= l_T/l_0)$ の変化に対する $\Delta f/f_0$ の変動を求める事が出来る。上例の場合につき算出すると $(\Delta f/f_0)/\Delta R_s = 0.032$, $(\Delta f/f_0)/\Delta R_l = 0.395$ となり、巾や厚さの増・減より BaTiO₃ の長さの増・減の方が共振周波数に大きく影響する事がわかる。



第 2.2 図

(2) 素地音片の対称 2 点接着チタペリ縦音片 第 2.2 図の様に素地音片の対称 2 点に BaTiO₃ の接着された場合は上記の m'_T , s'_T が夫々

$$\begin{cases} m'_T = \frac{1}{2} \rho_T S_T l_0 \left[\frac{l_2 - l_1}{l_0} - \frac{1}{\pi} \left(\sin \frac{l_2}{l_0} \pi + \sin \frac{l_1}{l_0} \pi \right) \right], \\ s'_T = \frac{\pi^2}{2} \frac{E_T S_T}{l_0} \left[\frac{l_2 - l_1}{l_0} + \frac{1}{\pi} \left(\sin \frac{l_2}{l_0} \pi - \sin \frac{l_1}{l_0} \pi \right) \right] \end{cases} \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

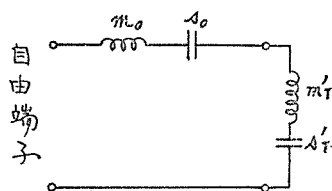
の様に与えられるからこの時の皮相共振周波数 f'_1 は (2.4), (2.5) 式を参照して

$$f'_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s_0 + s'_T}{m_0 + m'_T}} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

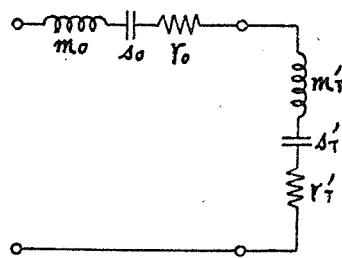
として求められる。簡単な計算から貼付位置により皮相共振周波数は増・減 ($f'_1 \gtrless f_0$) する事がわかる。

(3) チタバリ縦音片の等価回路と Q

前節(1)に於ける考察は各エネルギーを求め之に Rayleigh 法を適用した事に外ならないから、之に Lagrange の式を適用すると自由端に換算した駆動インピーダンス 即ち



第2.3図



第2.4図

第2.3図 の等価回路が得られる。更に素地音片及び貼付チタバリの振動損失をも考慮する場合は第2.4図 の様な等価回路となる事は容易に証明出来る。更に之等は第2.5図 の様な接着位置をも表示する等価回路に変換出来る。^② 但し第2.2図に於て原点から $(l_1 + l_2)/2$ なる点を $\pm X_2 (= x_2/l_0)$ とし右側の自由端を $X_1 (= +1/2)$ とすると、基本振動のみを考える時

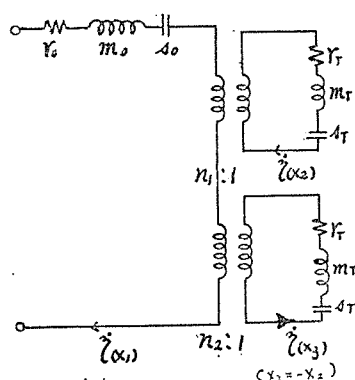
$$n_1 = \frac{\eta(X_2)}{\eta(X_1)}, \quad n_2 = \frac{\eta(-X_2)}{\eta(X_1)} \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

なる関係式が成立する、同図中 m_T , s_T , r_T は夫々 $\pm X_2$ 点に於ける諸定数値である。

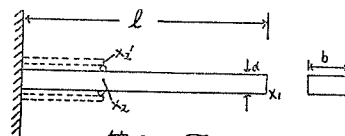
(4) チタバリ縦音片の模型的考察

接着剤の影響を直観的な等価回路表示に依つて知るため $BaTiO_3$ を水晶の場合に類推し第2.6図の様な一点接着チタバリ音片を考える。§2.5 に記し

たが $n=1$ の時素地音片の中央原点の変位は零であるから之を固定端(開放端子)と看做せば第2.1図は結局第2.6図に置換し考える事が許される。W.P. Mason によれば一端固定の圧電振動子の等価回路は第2.7図の様に表され諸定数は



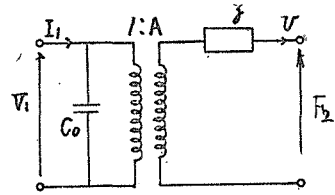
第2.5図



第2.6図

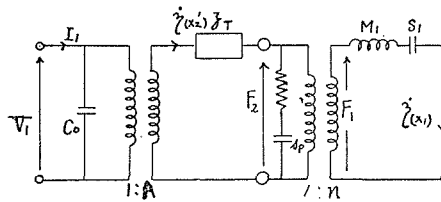
② 例えば 近野；音片振動子の支持に関する研究，山形大紀要，Vol.3, No.2, 昭29.12

$$\begin{cases} \beta_T = -j\beta_0 \cot \frac{\omega l_T}{c'} & , & c' = \sqrt{\frac{(1-k^2)E_T}{\rho_T}} \\ \beta_0 = b \cdot d \sqrt{\rho_T(1-k^2)E_T} & , & A = \frac{-DKb}{4\pi} \\ k = D\sqrt{\frac{K}{4\pi E_T}} & , & \end{cases} \dots\dots\dots(2.9)$$



第2.7図

の如く与えられる。茲に K は誘電率である。故に第2.6図は第2.8図の等価回路網で表示される。実際



第 2.8 図

上は、縦振動のみが起振されるように素地音片の両側面で駆動する。但し変成比 n は規準函数 $u_1(X_2)/u_1(X_1)$ の比で与えられ、 r_p, s_p は接着剤の等価抵抗及び等価ステツフネスである。

§ 2.2 チタバリ縦音片の総合周波数温度係数について

$BaTiO_3$ のヤング率の温度係数は $+(2\sim 3) \times 10^{-3}/^{\circ}C$ 程度であり、鉄製素地音片のそれは $-2 \times 10^{-4}/^{\circ}C$ 程度である。従って貼付 $BaTiO_3$ 及び素地音片の寸法比を適当に選定すればチタバリ縦音片の総合周波数温度係数を零とする事が出来る。

次にヤング率の温度係数 ε のみに注目し線膨脹係数を省略し近似計算を試みる。第2.1図に示す中央部貼付チタバリ縦振動音片の共振周波数は (2.5)式 で与えられるが同式は更に

$$f_1' = f_0 \sqrt{\frac{1 + R_B R_S \left(R_l + \frac{1}{\pi} \sin \pi R_l \right)}{1 + R_p R_s \left(R_l - \frac{1}{\pi} \sin \pi R_l \right)}} \doteq f_0 \left[1 + \frac{1}{2} R_s (R_E A_{(Rl)} - R_p B_{(Rl)}) \right] \dots\dots\dots(2.10)$$

の様に書換られる。

$$\begin{aligned} \text{茲に } R_B &= E_T/E_0, \quad R_S = S_T/S_0, \quad R_p = \rho_T/\rho_0, \quad R_l = l_T/l_0, \quad f_0 = c_0/2l_0, \\ c_0 &= \sqrt{E_0/\rho_0}, \end{aligned}$$

$$A_{(Rl)} = R_l + \frac{1}{\pi} \sin \pi R_l, \quad B_{(Rl)} = R_l - \frac{1}{\pi} \sin \pi R_l, \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

で、また $R_p R_s B_{(Rl)} < 1$ とする。

標準温度に於ける R_B, f_0 を夫々 $(R_B)_c, (f_0)_c$ とすると $t^{\circ}C$ では

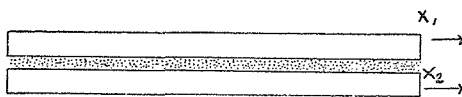
$$\begin{aligned} R_B &= \frac{E_T}{E_0} \doteq (R_B)_c \left[1 + (\varepsilon_T - \varepsilon_0)t \right] \equiv (R_B)_c (1 + \varepsilon t), \\ f_0 &\doteq (f_0)_c \left(1 + \frac{\varepsilon_0}{2} \right), \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

となるから (2.8)式 は近似的に

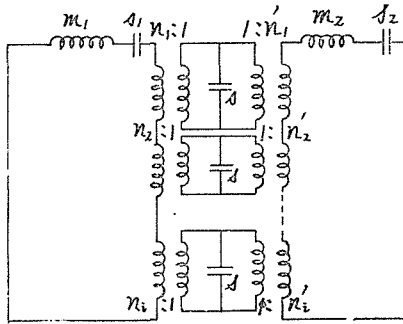
$$f_1' \doteq (f_0)_c \left[\left(1 - \frac{R_s R_p}{2} B + \frac{(R_B)_c R_s}{2} A \right) + \frac{t}{2} \left\{ (R_B)_c R_s A - \varepsilon_0 \left(\frac{(R_B)_c R_s}{2} A + \frac{R_s R_p}{2} B - 1 \right) \right\} \right] \dots\dots\dots(2.13)$$

の様に表される。茲に A, B は夫々(2.11)式の $A(R_l), B(R_l)$ である。一例として全面電極 ($l_T=l_0$) の場合につき計算すると $R_B=E_T/E_0=0.465$, $R_p=\rho_T/\rho_0=0.705$, $A=B=1$, $\varepsilon_T/\varepsilon_0=-10$ となるから $R_S=S_T/S_0=0.2$ を得る。京大阿部・田中教授の実測値^③では $R_S=0.17\sim 0.25$ となっている。以上の考察では線膨脹係数 (α) や接着剤その他の影響を無視して居り正確とは云い得ないが大略の値を知る上に役立つ。猶、厳密な解を求めんとする場合は上記の ε, α を共に考慮し(2.5), (2.10)式につき詳しく計算する必要がある。

また上例では素地音片として鉄材 ($\varepsilon=-2\times 10^{-4}$) を使用したがエリンバーの様な材質の素地音片を使用する時は補正 $BaTiO_3$ 寸法は更に小となる。



第2.9図



第2.10図

次に張合せ音片の近似的等価回路を示す。張合せ音片とは第2.9図に示す様な正負の周波数温度係数を有する二種の金属を銀ろう付けしたものでその縦振動時の等価回路網は第2.10図の様に表される。^{③④}

茲に s は銀ろう部の単位長当りの等価ステップネスで、 $n_i=u_i(x_i)/u_1(x_1)$, m_i, s_i ; m_2, s_2 は端部に於ける各音片の等価質量及びステップネスである。今

$$s \int_0^{l_0} u_i^2(x) / u_1^2(x_1) \cdot dx \equiv s_e \text{ とおけ}$$

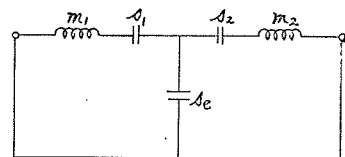
ば第2.10図は第2.11図の等価回路に置換される。之より張合せ音片の周波数温度係数を零ならしめる諸条件について論議する事が出来る。但し上記の考察に於ては $n=1$ のみを考えているが一般には高次迄考慮する必要がある事は勿論で

ある。

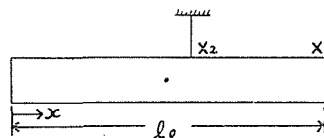
§ 2.3 チタバリ縦音片の支持とその影響

縦振動音片の共振周波数並びに Q に及ぼす支持の影響については別に詳細な報告を行っているので^{②④⑤} 本文では支持の設計に必要な諸事項のみに限って説明する。猶ポァソン現象をも考慮した場合については次節に述べる。

縦振動音片の解析には分布定数回路網的考察と等価集中回路網的考察の2種があるが後者につき説明する。第2.12図に示す様な第1次振動の節点近傍の任意点 $X_2(=x_2/l_0)$ で支持された縦振動音片を



第2.11図



第 2.12 図

③ 阿部・田中；電気三学会関西支部連大予，昭27.10，

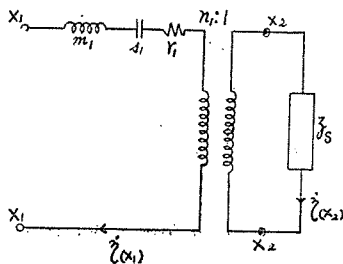
④ 近野；標準周波数源となる縦振動音片に関する研究，山形大紀要，vol.2, No.2, 昭28.12.

⑤ 永井・近野；縦振動音片及び磁歪振動子の支持の影響について，電気三学会東北支部連大予 昭28.11

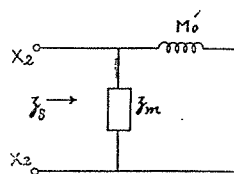
考えその支持インピーダンスを δ_S , X_1, X_2 間の相互機械インピーダンスを $\delta_{X_2 X_1}$ とすると X_1 点に於ける入力インピーダンス δ_i は

$$\delta_i = \frac{1}{\frac{1}{\delta_{X_1 X_1}} - \frac{\delta_S}{\delta_{X_1 X_2}^2} \left(\frac{1}{1 + \frac{\delta_S}{\delta_{X_2 X_2}}} \right)} \doteq \delta_{X_1 X_1} + n_1^2 \delta_S \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

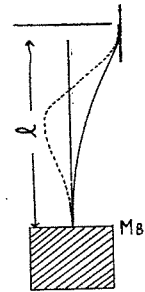
にて与えられる。茲に $n_1 = u_1(X_2)/u_1(X_1)$ で第1次規準振動のみを対象としている。即ち支持の設計条件として (i) $n_1 = 0$, 微小面積正規節点支持, (ii) $\delta_S = 0$, 働作周波数で δ_S 共振。 (iii) δ_S 中の抵抗成分 r_S の微少化等が挙げられ (2.14) 式 から 第2.13図 の等価回



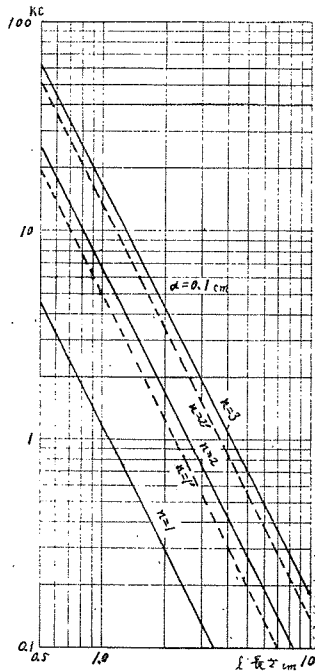
第2.13図



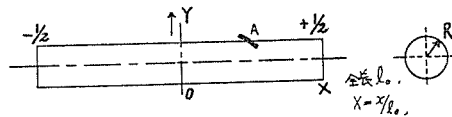
第2.14図



第2.15図



第2.16図



第 2.17 図

路網を得る。今支持台を質量 M_B を有するブロックと考えると支持インピーダンス δ_S は 第2.14 図 の等価回路にて表される。^⑥ 但し支持装置の振動姿態は第2.15 図の様に両端の傾斜が零となる場合を考える。また δ_m の共振角周波数 ω_m は $\omega_m = \alpha_m^2 / l^2 \cdot \sqrt{K/\rho S}$ にて与えられ M_B が無限大の時 $\alpha_1 = 2.365, \alpha_2 = 5.498, \alpha_3 = 8.639 \dots\dots$ となる。第2.16 図 は $d=0.1\text{cm}\phi$ の鋼針長に対する共振周波数である。斯る現象の実験的な検証は後述する様に 第1.1図 或は 第6.1図 の一側面駆動の場合に行われる。

⑥ 鈴木; 機械振動定数表, 昭和23.12.

§ 2.4 縦振動音片のポアソン現象に対する考察

本節では縦振動音片のポアソン現象につき考察し前節の之を無視した諸考察に対する補足を行う。

(1) ポアソン現象に依る変位とその対策

第2.17図に示す様な均一縦振動音片に於て歪を ϵ_x とすると $l_0 > R$ の時 $x/l_0 = X$ として

$$\epsilon_x = \epsilon_0 \cos \pi X \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

を得る。茲に ϵ_0 は $X=0$ 点に於ける歪みである。今任意点 X に於ける長軸方向の変位を η_x とすると

$$\eta_x = \int_0^x \epsilon_x dX = \frac{\sigma_0}{\pi E} \sin \pi X \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

となる。茲に σ_0 は $X=0$ 点の歪応力で E はヤング率である。ポアソン現象を考慮し半径方向の変位 ξ_R を求めるとポアソン比を μ として

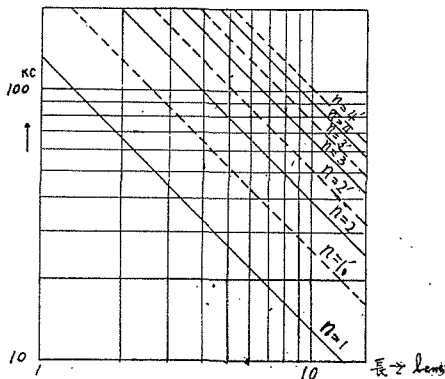
$$\xi_R = \int_0^R -\mu \epsilon_x dy = -\frac{\mu \sigma_0 R}{\pi E} \cos \pi X \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

を得る。故に第2.17図の一点 A に於ける変位の傾斜は

$$-\frac{\xi_R}{\eta_{xa}} = \frac{\mu R}{\tan \pi X_a} \left(\div \frac{\mu R}{\pi X_a}, \quad \pi X_a \rightarrow 0 \right) \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

となり A 点は第2.17図に示す様な変位を行う。従って第2.12図に於いて $X=0$ 点で垂直に支持された音片の支持棒は縦方向の垂直力を受ける事がわかる。また $X \neq 0$ なる任意点で支持された場合は支持棒は夫々の成分に相当する横振動の力及び縦振動の起振力を受ける。

前節に述べた如く「標準振動子の支持は節点 ($X=0$) にて行うべきである」と云う結論に従えば本節の結果では $X=0$ で $\eta_{x=0}=0$, $\xi_{x=0}$ 最大となり不都合な結果となる。以上の近似的考察から直ちに結論を求める事は少しく粗に失するが、これらの事実は縦振動音片の支持の設計に際しては注意されるべきである。即ち (i) 支持点が $X=0$ なる所謂節点支持の場合、支持針長が働作周波数で $\lambda_1/4$ (或はその奇数倍) に等しくない時リアクタンスとして作用する。 (ii) 支持点 $X \neq 0$ の場合、長軸及び半径方向に変位成分が



第 2.18. 図

あり特に X が 0 に近い程ポアソン比に依る半径方向の変位が大となる。 (iii) 半径 R の大なる程斯る事実は拡大される。

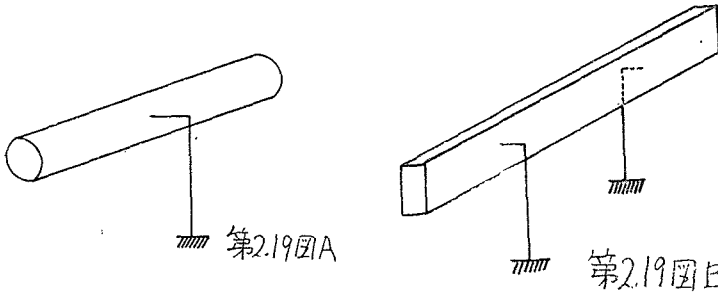
(iv) 支持装置設計の最大条件は「支持点に於ける支持棒の機械インピーダンスを働作周波数に於て反共振状態としない事」である。

次にこれらの具体例につき少しく説明する。第2.18図は支持針の長さ (l) に対する縦振動の共振, 反共振周波数を示す。即ち或働作周波数で支持インピーダンス $3s$ は正・負のリアクタンス 或は共振,

反共振となる。例えば $l < 5\text{cm}$ の時 25KC 以下の縦振動音片に対し s_s は常に容量的に作用する。斯る事実は設計に際してのみならず既製試作品の支持の影響を吟味する上にも役立つものと考えられる。第 2.12 図 の様な任意点支持の場合は支持棒の縦・横振動について考慮する必要がある、両振動に対し高次振動迄考慮し共振条件を満足させる事は一般

に難しい。

また中央点支持の場合でも実際上は $l < 5\text{cm}$ 程度であるから共振を望む事は無理で第 2.19 図の様に支持部の変位を全て撓み振動系で

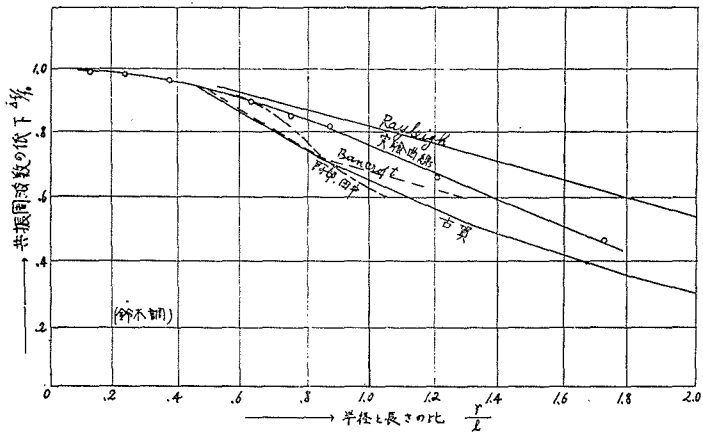


受ける様にするのも一案であろう。

(2) ポアソン現象をも考慮した場合の共振周波数の補正
振動子が充分細く長い場合縦振動音片の共振周波数 f_{0n} は

$$f_{0n} = \frac{n}{2l_0} c_0, \quad c_0 = \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

にて与えられるが振動子の太さが大となると横縮みの影響による運動エネルギーの増加をも考慮する必要が生じ一般にその周期は長くなる。縦振動棒の解析については多くの研究があり第 2.20 図の様な特性を与えているが⑦⑧ Rayleigh の補正式⑨を採用すると(2.19)式は



第2.20図

$$f_n = \frac{n}{2l_0} \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} \left(1 + \frac{n^2 \pi^2 \mu R^2}{2l^2}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

となる。

茲に R は振動子の半径で μ はポアソン比, n は振動次数である。(2.19), (2.20)

式から

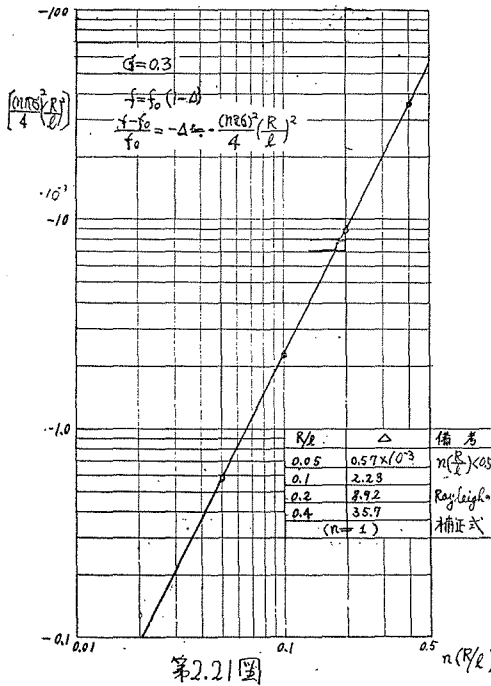
$$\frac{\Delta f}{f_{0n}} = \frac{f_n - f_{0n}}{f_{0n}} = -\frac{\pi^2 \mu^2}{4} \left(n \frac{R}{l}\right)^2 \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

⑦ 菊地, 鈴木, 伊藤; 東北大電通連合談話会 昭28.7

⑧ 能本: 音響学誌, vol.9, No.1, 昭28-3, (総合報告) ⑨ Rayleigh: Theory of Sound vol.1. p251.

を得る。

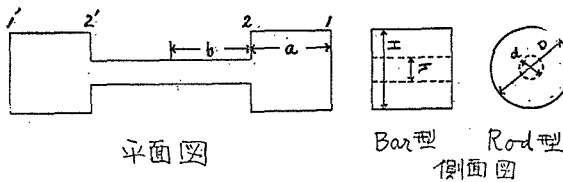
第2.21図は $\left(n \frac{R}{l}\right)$ に対する $\Delta f / f_{0n}$ を表す。



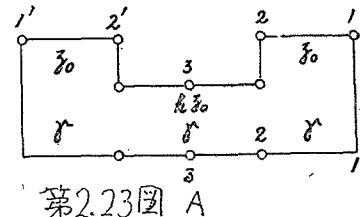
§2.5 高次振動縦音片について

音片を高次振動にて使用する事は種々の利点と缺点とを伴う。即ち支持の安定性と高い振動数の得られる事が利点となるが支持点数の増加によるQの低下、同一エネルギーで駆動する場合の高次振巾の減少等がその缺点となる。

次に変形縦振動音片を例に取りその高次振動につき説明する。均一縦振動音片はその特例として含まれる。第2.22図に示す様なRod型及びBar型の変形縦振動音片は第2.23図Aの複合送電線に等価置換され更に偶数次(例えば $n=2$)の共振振動のみを対象とする場合は同図Bの様な中央短絡線路の共振を論ずれば良い。^{④⑩} 即ち断面比を k とすると駆動点インピーダンス δ_i は



第2.22図



$$\delta_i = \delta_0 \tanh \left[\gamma a + \tanh^{-1} k \cdot \tanh \gamma b \right] \quad \cdots \cdots (2.22)$$

にて与えられ共振条件は $\delta_i = 0$ として求められる。今、

$$a = \alpha \frac{\lambda_0}{4}, \quad b = \beta \frac{\lambda_0}{4}, \quad \gamma = j \frac{\omega}{c} \quad \cdots \cdots (2.23) \quad \text{第2.23図 B}$$

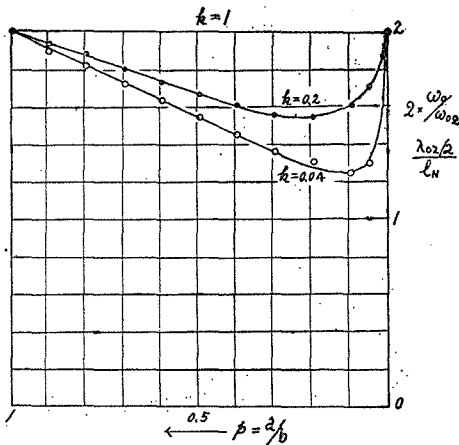
とし共振条件を求めると

$$\tan \alpha \frac{\pi}{2} + k \tan \beta \frac{\pi}{2} = 0.$$

$$\text{or, } \tan p \left(\beta \frac{\pi}{2} \right) + k \tan \left(\beta \frac{\pi}{2} \right) = 0.$$

⑩ Kikuchi & Fukushima ; Sci. Rep. R.I.T.U, B, vol. 1,2, No.1 Jan., 1951

但し $p = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{a}{b}$ (2.24)
を得る。



第 2.24 図

第2.24図 及び 第2.1表 は $k=0.04, 0.2$ の各場合に於ける 寸法比 a/b に対する共振周波数の値を示す。但し縦軸の l_N は中央点から節点位置迄の距離で、 ω_{02} は 均一断面音片の第2次共振角周波数を、 λ_{02} はその波長を表す。従って之等の間には

$$2(a+b) = \lambda_{02},$$

$$f_{02} = \frac{\omega_{02}}{2\pi} = \frac{1}{2(a+b)} \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} \dots\dots (2.25)$$

なる関係がある。

第2.24図 につき 少しく 説明 しよう。

(i) $a/b=1.0$ の時 $\omega=\omega_{02}$, 即ち 均一棒及び $a=b$ なる縦音片の共振周波数は断面比 k に関係なく一定となる。(ii) $k=0.04$ の時は $a/b \approx 0.1$ に、 $k=0.2$ の時は $a/b \approx 0.2$ 附近に共振周波数の最小点が生ずる。而してこの場合 ($k < 1$)、節点は共に少しく外側に移動する。移動距離の最大値は $k=0.04$ の時は $a/b=0.1$, $k=0.2$ の時は $a/b=0.2$ の場合で a/b がこれら以外の値を取る時はいずれも節点の移動距離は之より小さい。

第 2.1 表

$k = 0.04$

p	$\beta \frac{\pi}{2}$	β	α	$\alpha + \beta$
0	3.1416	2	0	2
0.05	1.96	1.25	0.0625	1.3125
0.1	1.79	1.14	0.114	1.254
0.2	1.685	1.08	0.216	1.296
0.3	1.645	1.048	0.3144	1.3624
0.4	1.625	1.033	0.4132	1.4462
0.5	1.61	1.025	0.5125	1.5375
0.6	1.598	1.018	0.6108	1.6288
0.7	1.591	1.012	0.7084	1.7204
0.8	1.583	1.01	0.808	1.818
0.9	1.575	1.002	0.9018	1.904
1.0	1.57	1.00	1.000	2.0

$k = 0.2$

p	$\beta \frac{\pi}{2}$	β	α	$\alpha + \beta$
0	3.1416	2	0	2
0.05	2.6	1.65	0.06325	1.71325
0.1	2.28	1.45	0.145	1.595
0.2	2.01	1.28	0.256	1.536
0.3	1.876	1.195	0.3585	1.5525
0.4	1.8	1.145	0.458	1.603
0.5	1.74	1.11	0.555	1.665
0.6	1.69	1.08	0.648	1.728
0.7	1.66	1.06	0.742	1.802
0.8	1.63	1.04	0.8432	1.872
0.9	1.595	1.015	0.9135	1.9285
1.0	1.57	1	1	2

これらの結果は音片のみならず磁歪振動子に対しても何程か役立つところがあるであろう。また第2.24図に於て $p=a/b$ の代りに $q=b/a$ を用いてもその特性は変らない。本図表は縦振動音片の共振周波数を下げる場合に有効となる。

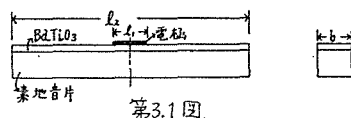
§§ 3 チタバリ縦振動音片の電気音響定数について

チタバリ縦音片の電気音響定数の詳しい解析に先立ち特種な形状のチタバリ音片について特性の大略を示し直観的把握に便ならしめる。そもそも BaTiO_3 はロッシエル塩 $X-45^\circ$ カット等と異なり電圧印加に依り全方向に伸縮する性質がある。

§ 3.1 近似的考察

今、第3.1図に示す様な全面的に貼付されたチタバリ音片を考えその振動変位を正弦波分布と仮定する。即ち

$$\eta_x = \eta_0 \sin \frac{k}{2} \pi \quad \dots\dots\dots (3.1)$$



第3.1図

茲に $k = l_1/l_2$ で、第3.1図の様な部分電極の場合は (3.1) 式の振動姿態は厳密には正しくない。

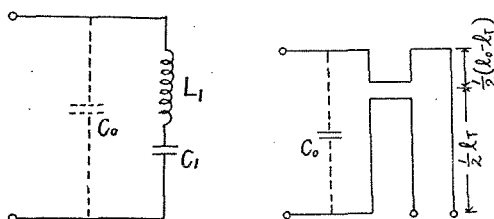
全面電極時の力係数を A_0 ，部分電極のそれを A とし $A/A_0 = K$ とすると，歪により電極に生ずる電流 I_s は圧電定数を e とすると

$$I_s = \frac{d}{dt} \left[2 \int_0^{l_1/2} b e \left(\frac{\partial \eta}{\partial x} \right) dx \right] = -j\omega 2be \eta_0 \sin \frac{k}{2} \pi \quad \dots\dots\dots (3.2)$$

となる。従って全面電極時の I_s を I_0 とすると

$$K = \frac{A}{A_0} = \frac{I_s}{I_0} = \sin \frac{k}{2} \pi \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

となり，部分電極の力係数は全面電極時の $\sin \frac{k}{2} \pi$ 倍となる。実際上は貼付チタバリ寸法も同時に変化する如き部分電極振動子であるから，第3.1図の例は適当とは云い得ないが，チタバリ音片を部分電極水晶の場合に類推し，少しく補正しただけで第3.2図に示す



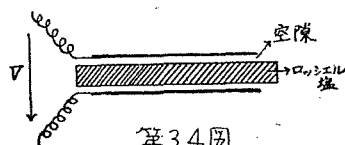
第3.3図

第3.2図

starr^⑪ の等価回路を考える事が出来るので便利である。第3.2図は等価送電線表示で，部分電極の影響は唯線路への入力端子位置の移動とのみ考える事が出来る。第3.3図は基本振動附近に於ける等価集中回路表示である。但し上記の類推解析を行うに際し，チタバリ縦音片を複合棒と考え平均の密度，ヤング率を考慮し諸定数を決定する必要がある。猶水晶の場合と同考察の下に 3/4 電極時の活性度極大，高次振動除去の電極配置等も考えられるが我々の実用せんとするチタバリ縦音片 (第3.5図) と少しく異なるので省略する。

§ 3.2 チタバリ縦振動音片の振動と基本式

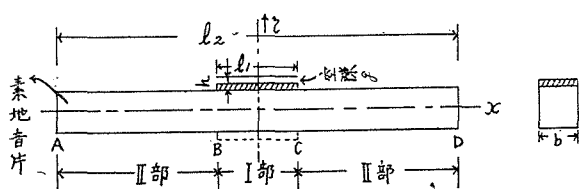
本節ではチタバリ縦振動音片の電気音響定数について考察する。鈴木辰男氏^⑫ は第3.4図に示す様なロッシエル塩振動子の部分電極について詳しい解析



第3.4図

⑪ A. T. Starr: W. E., 17, p201-202, June-July, 1940 [邦外誌 91号]

⑫ 鈴木；縦型ロッシエル塩振動子の働作とその一測定法；東北大電通談話会 昭26.8.



第3.5図

を発表されているが、これを
 少しく変形補正しただけで
 第3.5図のチタン酸バリウム
 接着縦振動音片に適用する事
 ができる。

次に同解析法に基づきチタ
 ン酸バリウム音片の電気音響定数を求

める。素地音片と接着 BaTiO₃ を一種の複合棒と考え微分方程式を解く点のみが異なる。

(1) チタバリ縦音片の基本式と等価回路網

圧電駆動型機械振動子の基本式は

$$\begin{cases} I = Y_d V + A v \\ P = -A V + \beta v \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.4)$$

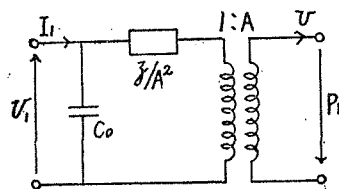
にて与えられる。茲に I は電流(源), Y_d は制動アドミッタンス, V は端子電圧, β は機械インピーダンス, β_n は electrodynamic impedance, v は自由端の速度, P は印加力である。(3.4) 式は

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{A} & \frac{\beta}{A} \\ \frac{1}{AZ_1} & A + \frac{\beta}{AZ_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -P \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \beta/A^2 \\ 1/Z_1 & 1 + \frac{\beta}{A^2} \cdot \frac{1}{Z_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1/A & 0 \\ 0 & A \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -P \\ v \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

の様に書換えられる。之より第3.6図の等価回路表示を得る。以下これら諸定数の導出を試みる。⑩

(2) チタバリ縦振動音片の振動

第3.5図に示す様に中央を原点としI部, II部の3部に分ちサフィックス1,2を以て表示する。またサフィックス o, t を以て素地音片(II部), BaTiO₃ を表す。縦振動棒は送電線に類推して考えられるからIの部分素地音片と BaTiO₃ の複合棒と考えると,



第3.6図

$$\begin{cases} c_2 = c_0 = \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} \\ c_1 = \sqrt{\frac{E_t S_1}{\rho_t S_1}} = \sqrt{\frac{E_0 S_0 + E_t S_t}{\rho_0 S_0 + \rho_t S_t}} = c_0 \sqrt{\frac{1 + R_E R_s}{1 + R_p R_s}} = c_0 \left[1 + \frac{R_s}{2} (R_E - R_p) \right] \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.6)$$

$$\begin{cases} \beta_{02} = \beta_{00} = \rho_0 c_0 S_0 \\ \beta_{01} = \rho_t c_t S_t = \beta_{02} \left[1 + R_p + R_s + \frac{R_s}{2} (R_E - R_p) \right] \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3.7)$$

を得る。茲に c は伝播速度, β_0 は特性インピーダンスで E_t は BaTiO₃ の実効ヤング率であり

$$R_E = E_t/E_0, \quad R_p = \rho_t/\rho_0, \quad R_s = S_t/S_0 \quad \dots\dots\dots (3.8)$$

である。

電圧 V で駆動した場合を考えその時生ずる応力による力は、圧電定数を e' とすると

$$P_1 = b e' \frac{h}{t} V, \quad \dots\dots\dots (3.9)$$

$$t = h + g$$

にて与えられる。今この力 P_1 が 第3.5図 の B, C 点に夫々反対方向に作用するものとし、その時の振動変位 η を求めると I 部, II 部に於ける微分方程式及び境界条件

$$\begin{cases} x=0 \text{ で } \eta_1=0, & x=l_2/2 \text{ で } \partial\eta_2/\partial x=0 \\ x=l_1/2 \text{ で } & \eta_1=\eta_2, \quad E_1S_1 \frac{\partial\eta_1}{\partial x} = E_2S_2 \frac{\partial\eta_2}{\partial x} + P_1 \end{cases}$$

から解として

$$\begin{cases} \eta_1 = \frac{P_1}{\Delta} \cos \frac{\omega(l_2-l_1)}{2c_2} \cdot \sin \frac{\omega}{c_1} x, \\ \eta_2 = \frac{P_2}{\Delta} \sin \frac{\omega l_1}{2c_1} \cdot \cos \left\{ \frac{\omega}{c_2} \left(\frac{l_2}{2} - x \right) \right\}, \\ \Delta = \omega \left\{ \dot{\eta}_{01} \cos \frac{\omega l_1}{2c_1} \cos \frac{\omega}{2c_2} (l_2-l_1) - \dot{\eta}_{02} \sin \frac{\omega l_1}{2c_1} \cdot \sin \frac{\omega}{2c_2} (l_2-l_1) \right\} \dots\dots\dots (3.10) \end{cases}$$

を得る。これは圧電的に駆動した場合の解である。

次に A, D 端子に $P_2 e^{j\omega t}$ なる駆動力を夫々反対方向に加えた場合の振動の変位を求めると境界条件として

$$\begin{cases} x=0 \text{ で } \eta_1=0, & x=l_2/2 \text{ で } E_2S_2 \frac{\partial\eta_2}{\partial x} = P_2, \\ x=l_1/2 \text{ で } \eta_1=\eta_2, & E_1S_1 \frac{\partial\eta_1}{\partial x} = E_2S_2 \frac{\partial\eta_2}{\partial x} \end{cases}$$

とおき解

$$\begin{cases} \eta_1 = \frac{P_2}{\Delta} \sin \frac{\omega}{c_1} x \\ \eta_2 = \frac{P_2}{\Delta} \left\{ \frac{\dot{\eta}_{01}}{\dot{\eta}_{02}} \cos \frac{\omega l_1}{2c_1} \sin \frac{\omega}{c_2} \left(x - \frac{l_1}{2} \right) + \sin \frac{\omega l_1}{2c_1} \cdot \cos \frac{\omega}{c_2} \left(x - \frac{l_1}{2} \right) \right\} \dots\dots (3.11) \end{cases}$$

を得る。

共振周波数は (3.10) 式で $\Delta=0$ とおき

$$\tan \frac{\omega l_1}{2c_1} \cdot \tan \frac{\omega}{2c_2} (l_2-l_1) = \frac{\dot{\eta}_{01}}{\dot{\eta}_{02}} \dots\dots\dots (3.12)$$

の根 ω_n として求められる。

全面貼付チタバリ縦音片の場合は、 $l_1=l_2$ とすると (3.12) 式は $\cot \frac{\omega l_2}{2c_1} = 0$ となるから

$$\begin{aligned} f_n &= \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{n}{2l_2} \sqrt{\frac{E_1}{\rho_1}} = \frac{n}{2l_2} c_2 \left[1 + \frac{R_s}{2} (R_B - R_p) \right] \\ &= f_{0n} \left[1 + \frac{1}{2} R_B R_s \left(1 - \frac{k^2}{1-\beta\epsilon} \right) - R_p R_s \right] \dots\dots\dots (3.13) \end{aligned}$$

となる。

$$\text{茲に } f_{0n} = \frac{n}{2l_0} \sqrt{\frac{E_0}{\rho_0}} ; \quad \beta = -\frac{4\pi g}{t} \dots\dots\dots (3.14)$$

である。銀メツキ電極の場合は $g=0$ 即ち $\beta=0$ となる。また (3.13) 式から

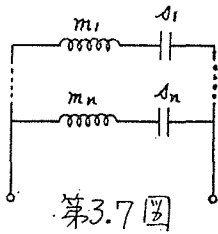
$$\frac{\Delta f}{f_{0n}} = \frac{f_n - f_{0n}}{f_{0n}} = \frac{R_s}{2} (R_B - R_p) \dots\dots\dots (3.15)$$

を得る。

これより全面貼付チタバリ縦音片の皮相共振周波数を算出する事が出来、また周波数温度係数をも論ずる事が出来る。

$l_1 \neq l_2$ なる一般のチタバリ縦音片では (3.12) 式を図式的に解く必要がある。

(3) 電気音響定数



(i) 機械インピーダンス z ($P_2 = zv$, $V = 0$)
 機械端子を自由端に取り両端に P_2 なる反対方向の力を作用させた場合の自由端の速度 v_{p2} は $v_{p2} = j\omega[\eta_2]_{x=l_2/2}$ として与えられるから $z = 2P_2/v_{p2}$ として z が求まる。これに Mittag Leffer の定理を適用すると結局 第3.7図の等価回路網が得られる。

但し

$$\begin{cases} m_n = \frac{1}{2} \left\{ \rho_2 S_2 (l_2 - l_1) + \rho_1 S_1 l_1 \frac{\cos^2 \frac{\omega_n}{2c_2} (l_2 - l_1)}{\sin^2 \frac{\omega_n l_1}{2c_1}} \right\} \\ s_n = m_n \omega_n^2 \end{cases} \dots\dots\dots (3.16)$$

である。

全面貼付チタバリ縦音片では $l_1 = l_2$ として

$$\begin{cases} m_n = \frac{1}{2} \rho_1 S_1 l_1 \\ s_n = n^2 \frac{\pi^2 E_1 S_1}{2l_2} = n^2 \frac{\pi^2 E_0 S_0}{2l_0} + n^2 \frac{\pi^2 E_2 S_2}{2l_2} \end{cases} \dots\dots\dots (3.16)'$$

となる。

(ii) 力係数 A_1 , ($P = -A_1 V$, $v = 0$)

A_1 は電圧 V で駆動されているチタバリ縦音片の速度 v_V を零とする様な外力 $-P$ と V との比で与えられる。この v_V は (3.10) 式から $v_V = j\omega[\eta_2]_{x=l_2/2}$ として求められる。一方機械端子に P なる力を加えた時 (即ち両自由端に夫々反対方向に $\frac{1}{2}P$ を加えた時) の速度 v_p は (3.11) 式の v_p の $1/2$ として与えられるから $v_V + v_p = 0$ とおき $A_1 = -P/V$ として A_1 が求められる。特に共振状態では (3.12) 式の条件から

$$A_1 = 2 \cos \frac{\omega_n}{2c_2} (l_2 - l_1) b \frac{h}{t} e' \dots\dots\dots (3.17)$$

となり、更に全面貼付チタバリ音片の時は

$$A_1 = 2b \frac{h}{t} e' \dots\dots\dots (3.18)$$

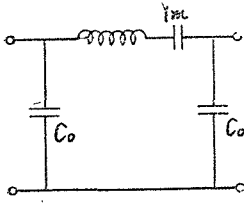
となる。即ち空隙の増加と共に力係数は減少する、

また力係数は $V = 0$ なる時の短絡電流から $A_2 = I/v_p$ としても求められる ($A_1 = A_2$)。

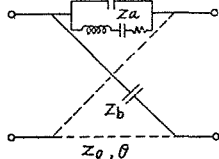
(iii) 制動アドミッタンス Y_d ($I = Y_d V$, $v = 0$)

機械端子の速度を零としても結晶内部は一般に振動しているから Y_d は結晶の無歪時の容量 C_0 のアドミッタンスとは異なる。即ち Y_d は機械端子を止めた状態のアドミッタンスである。電圧 V を加え機械振動子を止めた時の状態を、機械端子を自由にし電圧 V にて駆動した状態と $V = 0$ として機械端子に丁度之と大き等しく逆向きの速度を与えた時の振動状態との重畳したものと考え Y_d を求めると

$$Y_d = j\omega C_0 + j \frac{\left[2b \frac{h}{t} e' \right]^2 \left[\cos^2 \frac{\omega}{2c_2} (l_2 - l_1) \left\{ \frac{\partial \eta_1}{\partial \omega} \tan \frac{\omega}{2c_2} (l_2 - l_1) + \tan \frac{\omega l_1}{2c_1} \right\} - \tan \frac{\omega l_1}{2c_1} \right] \tan \frac{\omega l_1}{2c_1}}{2 \frac{\partial \eta_1}{\partial \omega} \left[\frac{\partial \eta_1}{\partial \omega} - \tan \frac{\omega l_1}{2c_1} \cdot \tan \frac{\omega}{2c_2} (l_2 - l_1) \right] \left\{ \frac{\partial \eta_1}{\partial \omega} \tan \frac{\omega}{2c_2} (l_2 - l_1) + \tan \frac{\omega l_1}{2c_1} \right\} \times \times \cos^2 \frac{\omega}{2c_2} (l_2 - l_1)} \dots\dots\dots (3.19)$$

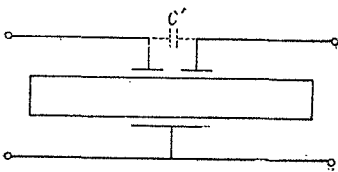


第4.4図A

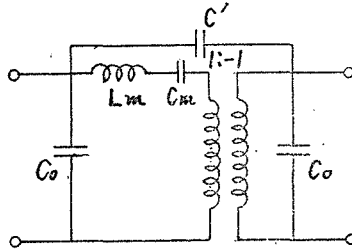


第4.4図B

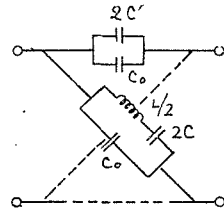
以上は端子間の静電結合 C' を無視した場合であるがこれを考慮する場合は夫々の等価回路の端子間に挿入すればよい。第4.5図A, B, Cはその一例である。また両端子に直列或は並列にインダクタンスを挿入した場合の例を第4.6図A, B; 第4.7図A, B に示す。⑩ 斯る例は発振器, 濾波器に於て有用となる。



第4.5図A



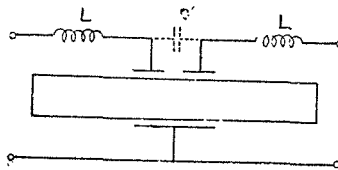
第4.5図B



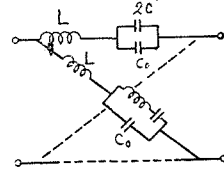
第4.5図C

§ 4.2 チタバリ複合縦振動音片

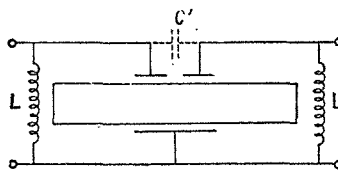
電磁駆動型複合機械濾波器では機械的なターミネーションに特殊の工夫を必要とするが圧電駆動型複合機械濾波器ではターミネーションをも兼ね駆動抽出する事が出来る。第4.8図は複合機械濾波器の一例であるがその規準振動に注目し機械的等価回路網を導出すれば縦振動, 横振動の別なく一般濾波器回路の問題と



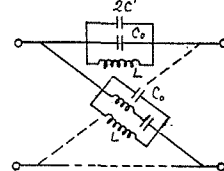
第4.6図A



第4.6図B

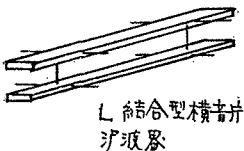


第4.7図A



第4.7図B

して共通に解析する事が出来る。本節では縦振動結合の例について電気音響変換の基本式に則り解析を試みる。横振動複合系の場合, その他試作結果については後日改めて報告する事とし省略した。

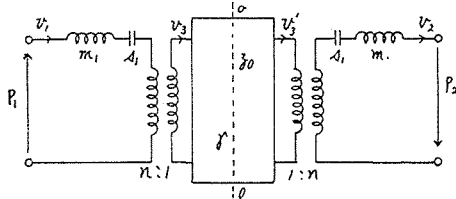


結合型横音片
濾波器

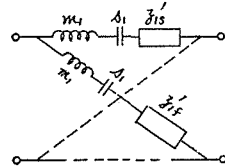
第4.8図

第4.8図の縦振動棒結合型の複合機械振動子の場合につき考察を試みる。音片が2個以上に亘る場合でも同様に考察を敷延する事が出来る。分布送電線えの等価置換が可能であるから二等分定理を適用し機械系の等価ラチス回路表示が出来る。また結合部が2個所以上に亘る場合でも之が節点附近で対称位置にある時は結合インピーダンスが2倍となったと考え論ずる事も出来る。今結

合部の特性インピーダンス，伝播定数を夫々 δ_0, γ とし動作角周波数 ω_1 に於ける等価質量，等価ステップネスを夫々 m_1, s_1 とすると第4.9図の軸対称等価回路網を得るから直ちに第4.10図の等価ラテス回路が得られる。但し l を結合棒の長さとする



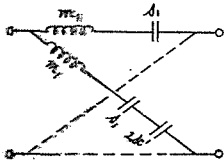
第 4.9 図



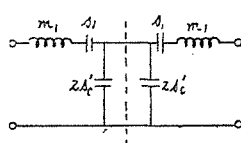
第4.10図

$$\begin{cases} \delta_{1s}' = n_1^2 \delta_{1s} = n_1^2 \delta_0 \tanh \frac{\gamma}{2} l, \\ \delta_{1f}' = n_1^2 \delta_{1f} = n_1^2 \delta_0 \coth \frac{\gamma}{2} l, \end{cases}$$

$$n_1 = \frac{u_1(X_2)}{u_1(X_1)} = \frac{u_1(X_2')}{u_1(X_1')} \quad \dots\dots\dots (4.6)$$



第4.11図A



第4.11図B

となる。従って $\omega = \omega_1 + \Delta\omega$ とし ω_1 の附近のみ考え $l \geq \lambda_1/4$ とすると $\delta_{1s}' \approx j\omega m_1'$, $\delta_{1f}' \approx \frac{2s_1'}{j\omega}$ とおけるから $m_1 > m_1'$ の時第4.10図は第4.11図A, B の等価回路で表される。同図BのT型回路の四端子定数を B, D, C とすると

$$D = 1 + \frac{\delta_1}{\delta_0}, \quad C = \frac{1}{\delta_0}, \quad B = 2\delta_1 + \frac{\delta_1^2}{\delta_0} \quad \dots\dots\dots (4.7)$$

となる。

以上で複合機械系の回路網表示が出来たから、之を電気系と結びつける。簡単のため $Y_{d1} = Y_{d2} = Y_d$, 力係数 $A_1 = A_2 = A$ とし, electrodynamic imp. を δ_n とし $\delta_{n1} + \delta_{n1}' = \delta_{11}'$, $\delta_n + \delta_{22} = \delta_{22}'$ (対称故 $\delta_{11} = \delta_{22}$) とすると,

$$\begin{cases} I_1 = Y_d E_1 + A v_1 \\ I_2 = Y_d E_2 + A v_2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.8) \quad \begin{cases} v_1 = y_{11}'(A E_1) + y_{12}'(A E_2) \\ v_2 = y_{21}'(A E_1) + y_{22}'(A E_2) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.9)$$

を得るからこれより

$$\begin{cases} I_1 = E_1(Y_d + Y_{11}) + E_2 Y_{12} \equiv E_1 Y_{11}' + E_2 Y_{12} \\ I_2 = E_1 Y_{21} + E_2(Y_d + Y_{22}) \equiv E_1 Y_{21} + E_2 Y_{22}' \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4.10)$$

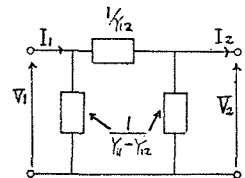
を得る。但し

$$y_{11}' A^2 = y_{22}' A^2 = Y_{11} = Y_{22}, \quad y_{12}' A^2 = Y_{12}, \quad Y_d + Y_{11} = Y_{11}', \\ A E_1 = \delta_n v_1 + \delta_{11} v_1 + \delta_{12} v_2 = \delta_{11}' v_1 + \delta_{12} v_2, \quad A E_2 = \delta_{21} v_1 + \delta_{22}' v_2 \quad \dots\dots\dots (4.11)$$

である。

従って $-E_2 = V_2$ とし (4.10) 式から四端子定数 $a=d, b, c$ を求めると

$$d = Y_{11}'/Y_{12}, \quad b = 1/Y_{12}, \\ c = (Y_{11}' - Y_{12}^2)/Y_{12} \quad \dots\dots\dots (4.12)$$



第4.12図

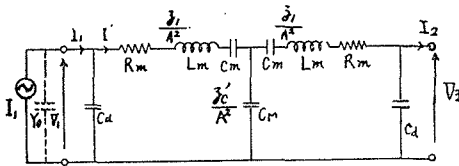
となるから 第4.12図 の等価 π 型 回路を得る。

(4.7)(4.11)式から, $\delta_1/A^2=Z_m$, $\delta'_c/A^2=Z_c$ として

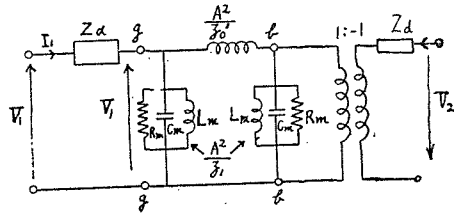
$$\begin{cases} Y_{11} = \frac{D}{B} \cdot A^2 = \frac{1}{Z_m + \frac{1}{1/Z_m + 1/Z_c}} = \frac{Z_m + Z_c}{Z_m(2Z_c + Z_m)} \\ Y_{12} = \frac{1}{B} \cdot A^2 = \frac{1}{2Z_m + \frac{Z_m^2}{Z_c}} = \frac{Z_c}{Z_m(2Z_c + Z_m)} \end{cases} \dots\dots\dots (4.13)$$

の如く与えられるから (4.12) 式の Y_d を省いた場合の四端子定数は

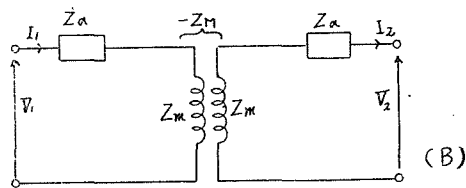
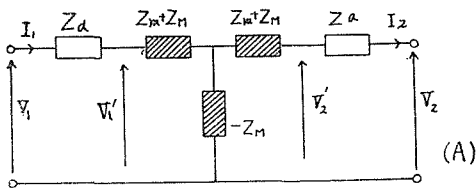
$$a' = d' = \frac{Z_m + Z_c}{Z_c}, \quad b' = \frac{Z_m^2 + Z_c Z_m + Z_c Z_m}{Z_c} \dots\dots\dots (4.14)$$



第 4.13 図



第 4.14 図



第 4.15 図

となり結局 第4.13図 の等価四端子回路を得る。

因みに電磁駆動型複合機械濾波器の場合⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾ は一般表示等価回路網が第4.14図の如くなり之の別表示回路が 第4.15図となる。但しこの場合は

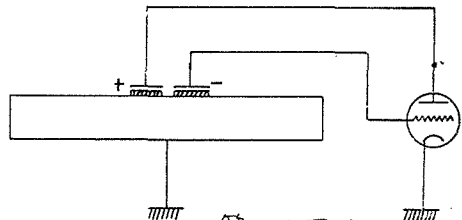
$$\begin{aligned} Z_{11} &= y_{11}' A^2 = \frac{Z_m(Z_m + Z_c)}{2Z_m + Z_c}, \\ Z_{12} &= y_{12}' A^2 = \frac{Z_m Z_m}{2Z_m + Z_c}, \\ Z_m &= A^2 / \delta_1, \quad Z_c = A^2 / \delta'_c, \end{aligned} \dots\dots\dots (4.15)$$

となる。

§§ 5 チタバリ縦音片発振器について

§ 5.1 発 振 機 構

前章ではチタバリ縦音片の等価四端子網について述べたが之を β 回路とし, μ 回路として真空管を用いればチタバリ音片発振器が構成される。第5.1図A, B は単球チタバリ音片



第5.1図 A

⑯ 近野; 複合機械フィルタに関する一考察 山形大学電気科談話会プリント 昭30. 7
⑰ 永井, 佐藤, 松谷; 電通学会東北支部連大予 昭28.11

の例で $C_{01}=C_{02}=C_0$, $A_1=A_2=A$ の時発振条件として

$$1 = \frac{R_p Z_s + Z_o(Z_o + Z_m)}{-\mu Z_o Z_o} \quad \dots\dots (5.1)$$

が得られる。但し R_p は陽極抵抗で $Z_s = Z_o + Z_m + Z_o$, μ は増巾定数である。同回路は clapp^⑧ が L-C

高安定回路として、コルビツ回路から誘導している様に電源電圧の変動 δE に対する周波数変動は

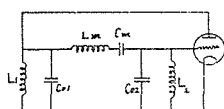
$$\frac{\delta \omega}{\delta E} = -\frac{\delta \mu}{\delta E} \left[\frac{1}{2\omega C_0 R_p R_f} \left(\frac{L_c}{L_m} \right) + \frac{1}{2QC_0 R_f} \right] \quad \dots\dots\dots (5.2)$$

となり同発振回路自身が一種の安定回路を構成している。茲に L_c はコルビツ型の共振回路のインダクタンスで $\omega L_c \equiv \left(\omega L_m - \frac{1}{\omega C_m} \right)$ なる関係にある。同回路は一般の水晶発振器の場合も成立する。

第5.1図の発振回路に於て(5.1)式の発振条件を適用し少しく計算すると条件

$$\begin{cases} (\mu+1) \doteq 2 - \frac{\Delta \omega}{\omega_m} \gamma \\ \omega = \omega_m \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

を得る。但し $\gamma = C_0/C_m$, $\Delta \omega = \omega - \omega_m$, $\omega_m^2 L_m C_m = 1$, とする。之よりリアクタンス素子と考えた場合の条件の大綱が求まる。即ち(i)力係数の大なる程所要 μ は小さくて済む, (ii) 高安定化を計り C_0 を大 (high C法) とすると所要 μ は大となる。(iii) γ の大なる程発振周波数は音片の共振周波数に近づき周波数安定係数は大となる。



第5.2図

第5.2図に示す様に入力・出力に並列にインダクタンスを挿入した場合 或はいずれか一方が缺けた場合についても同様に(5.1)式の条件に基づき解析する事が出来る。前者の場合、発振条件は

$$\begin{cases} (\mu+1) = L_m C_0 (\omega_m^2 - \omega^2) (\omega_2^2 - \omega^2) \frac{1}{\omega^2} , \\ \gamma / \omega_m^2 \cdot (\omega_m^2 - \omega^2) (\omega_1^2 - \omega^2) (\omega_2^2 - \omega^2) = \omega^2 (\omega_1^2 + \omega_2^2 - 2\omega^2) , \end{cases} \quad \dots\dots (5.4)$$

の如くなり発振周波数は格子、陽極同調角周波数 ω_1 , ω_2 にも関係する。この外内田, 本田, 菊地等の諸氏が水晶発振器について解析されている様な負抵抗法に依る解法, 影像パラメーターに依る解法等も試みられる^⑨が本文では省略する。

§ 5.2 チタバリ縦音片発振器の特性について

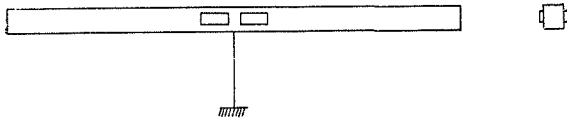
10KC 或はそれ以上の振動子では後述する様に電磁駆動型は渦流損その他の損失が大となり好ましくなく、縦振動型のチタバリ駆動方式が有効となる。本節では試作チタバリ縦音片発振器の諸実験結果について報告する。

(1) 試料並びに測定装置

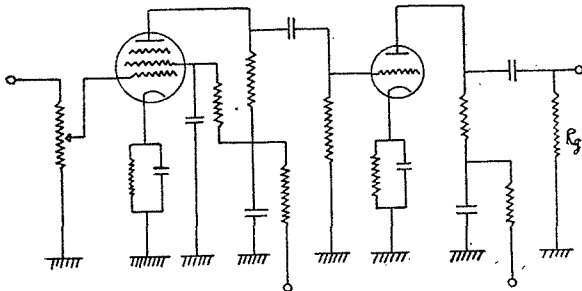
試料は 110×6×2.5(mm単位) の特殊合金(精工舎製)の素地音片に 5×4×1 の銀電極

⑧ J.K. clapp; I.R.E., vol. 36, March, 1948, p356,

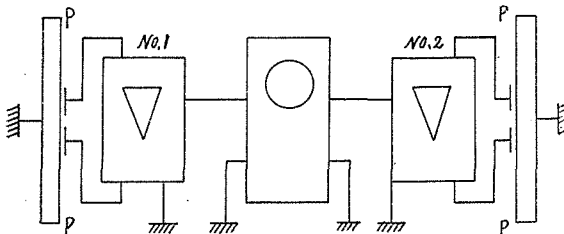
⑨ 近野：チタン酸バリウム駆動音片発振器について 昭30.4 山形大電気科談話会プリント



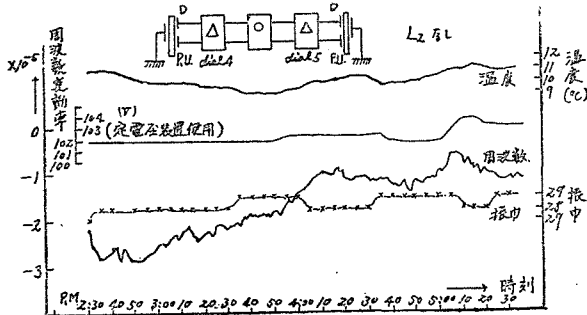
第5.3図



第5.4図



第5.5図



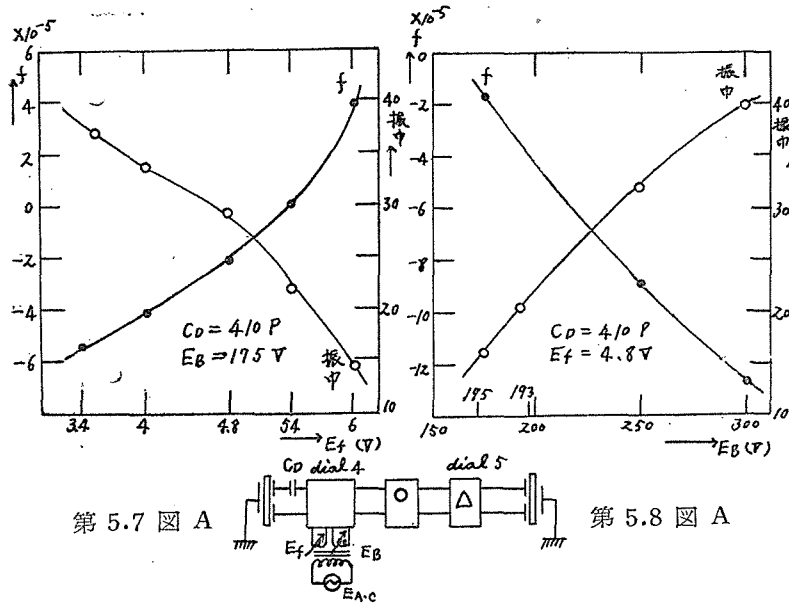
第5.6図

BaTiO₃を4枚貼付し第5.3図の如き構造とした。接着剤にはスチロールシェラックを使用しリード線に銅箔を用いた。発振周波数は $f_0=23.6\text{KC}$ である。第5.4図は発振器として使用した増巾器である。測定装置は第5.5図の様にブラウン管上のリサジウス図形の回転から周波数の変化を測定算出し又同時に振巾比例値をも読みとった。

(2) 測定結果

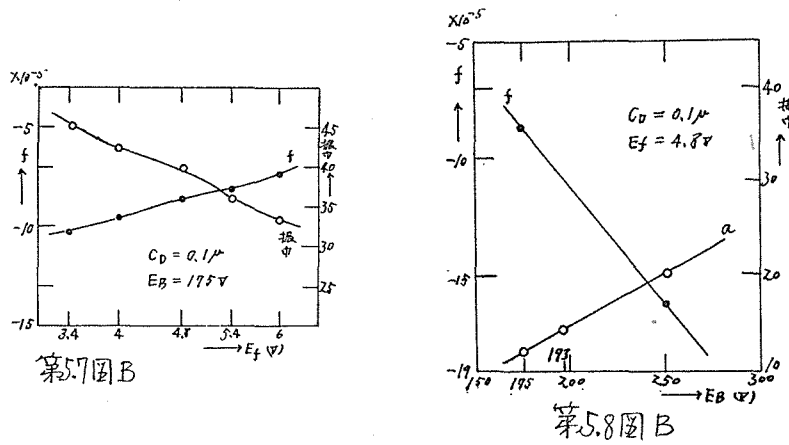
(i) 第5.6図は第5.5図の接続の下に測定した相対周波数変動率である。(ii) 第5.7図乃至第5.9図は電源電圧に対する発振周波数及び振巾の変化で、第5.7図A, Bはフィラメント電圧 E_f に対する $\Delta f/f_0$ を、第5.8図A, Bは陽極電圧 E_B に対する $\Delta f/f_0$ を示す。

結合コンデンサー C_D の大きい方が特性が良い。 E_f , E_B に対する $\Delta f/f_0$ の変化傾向が逆となる点に注目しA・C電源を変化し E_f , E_B 同時に変化したところ第5.9図の様に E_B の影響の方が強く表れた。(iii) ストップング容量 C_D の影響は第5.10図の様に C_D の大なる方が良好である。(iv) 素地音片は強磁性体材料を使用しているから外部磁界により周波数の変化する事が予想される。第5.11図はその実験値である。先に電磁駆動型横振動音



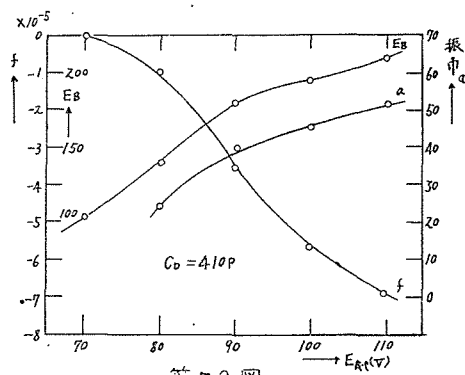
第 5.7 図 A

第 5.8 図 A

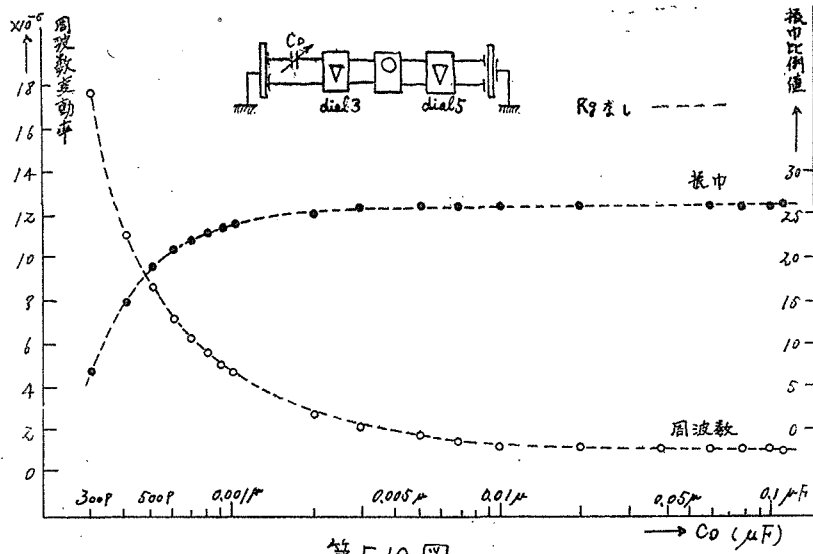


第 5.7 図 B

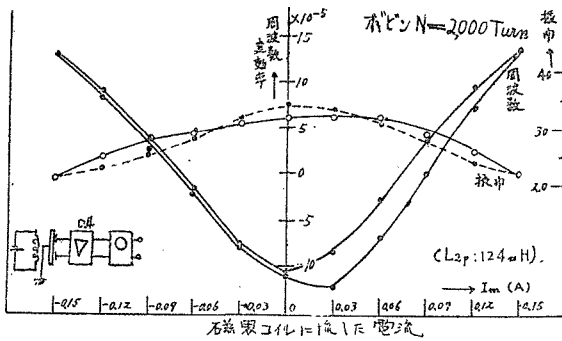
第 5.8 図 B



第 5.9 図

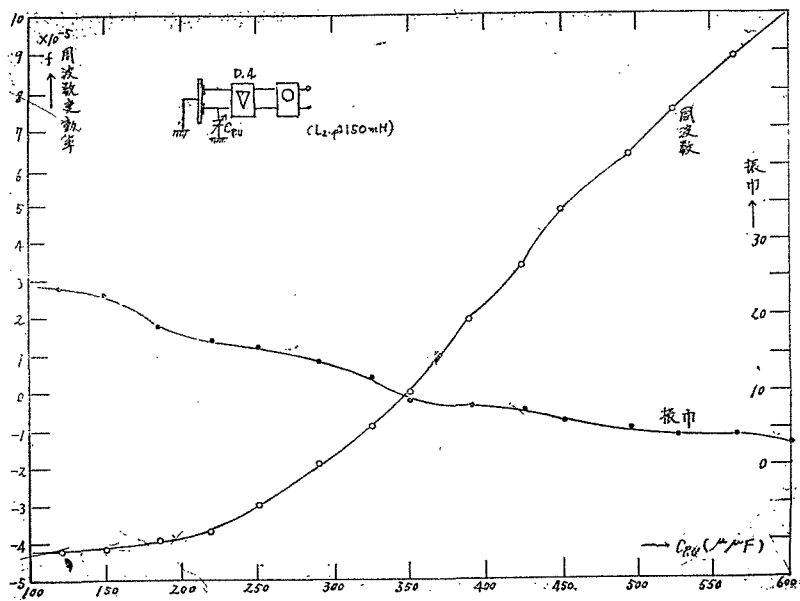


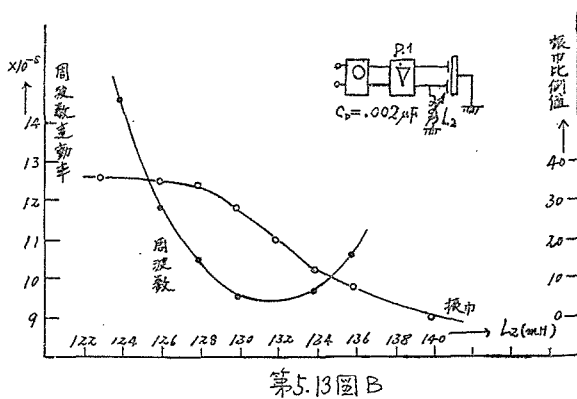
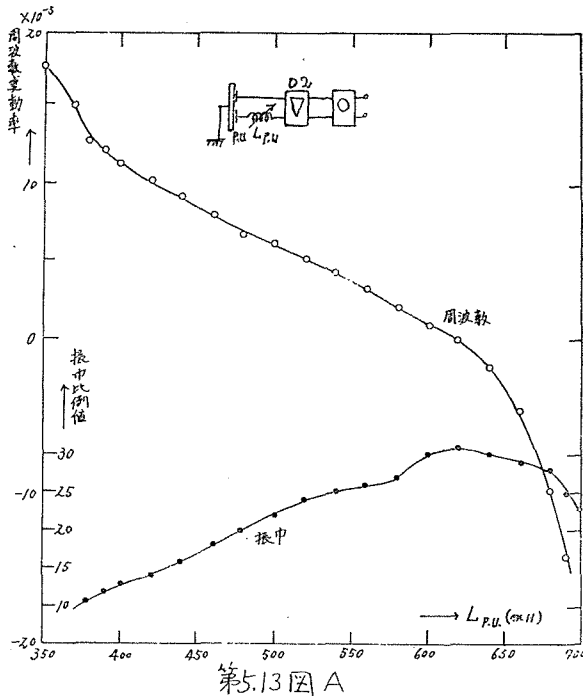
第5.10 図



第 5.11 図

第 5.12 図





片で行った外部磁界に依る発振周波数の変動の測定では外部磁界により駆動ユニットの磁束も異って来るから「 ΔE 効果」を論ずる事は無理であるが、圧電駆動方式による場合は上記の ΔE 効果を調べる上に好都合でありこの方面の応用も考えられる。猶、圧電駆動方式では素地音片は強磁性体でなくてもよいが周波数温度係数の良い素材は現在のところ強磁性体材料に多い。

(v) 第5.12図はピックアップ側に並列に容量 C_p を挿入した場合の結果で C_p の挿入に依り発振周波数の増加する事が認められる。(vi) 第5.13図乃至第5.15図は駆動側、抽出側及びその両側にインダクタンスを直列 或は、並列に挿入した場合の特性である。

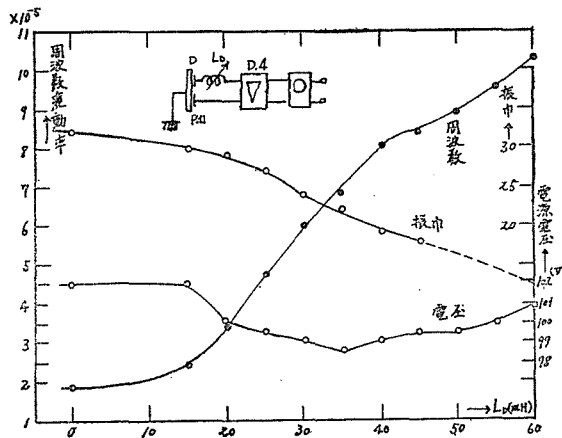
(vii) その他の実験、支持針長を 1cm から 4cm 迄変化し支持の影響を調べたが充分な結果は得られなかった。これについては更に精密な測定を必要とする。ピックアップ側に同調インダクタンスを挿入すると約 -5×10^{-5} 程度の周波数変動率の低下が認められた。周囲媒質の影響は略々 $5.5 \times 10^{-5}/760\text{mmHg}$ 程度であつた。

§5.3 チタバリ高次振動縦音片について

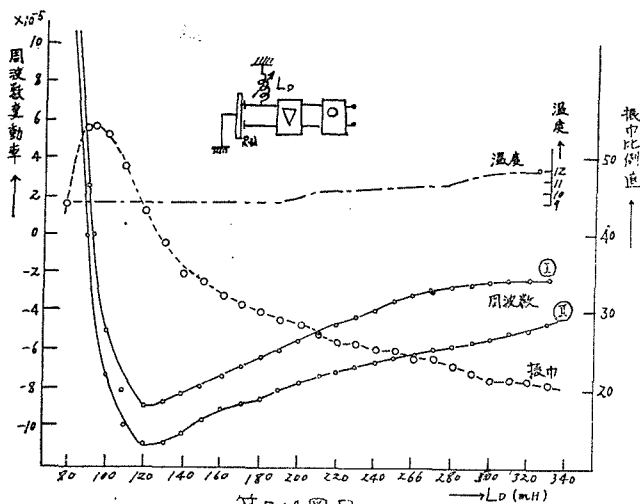
例えばスプリング支持を採用する場合、2倍長の素地音

片を使用し節点を2個所に生ぜしめ安定に支持する事が出来る利点がある。また鋼針支持を採用する場合でも50KC~100KC程度或はそれ以上の高い周波数を得る場合には高次振動音片が有効となる。

第5.16図は試料の略図で素地音片は鋼製で $200 \times 4.6 \times 2.4$; 支持鋼針は $0.8\text{cm}\phi$, 長さ 34.5mm ; 貼付 BaTiO_3 は $3 \times 5 \times 1$, 接着にはスチロールシエラツクを使用した。第5.17 図はピックアップ側にインダクタンスを並列に挿入した場合の発振振巾特性で或 L の値で振巾最大となっている。入・出力電圧比は30 V に於て 53db を示した。

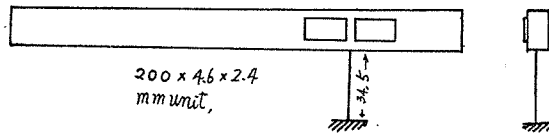
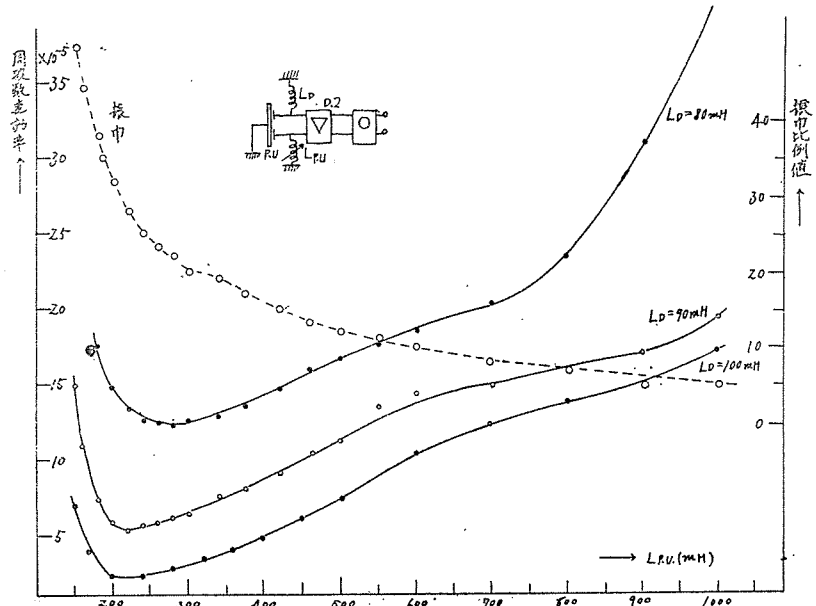


第5.14図 A

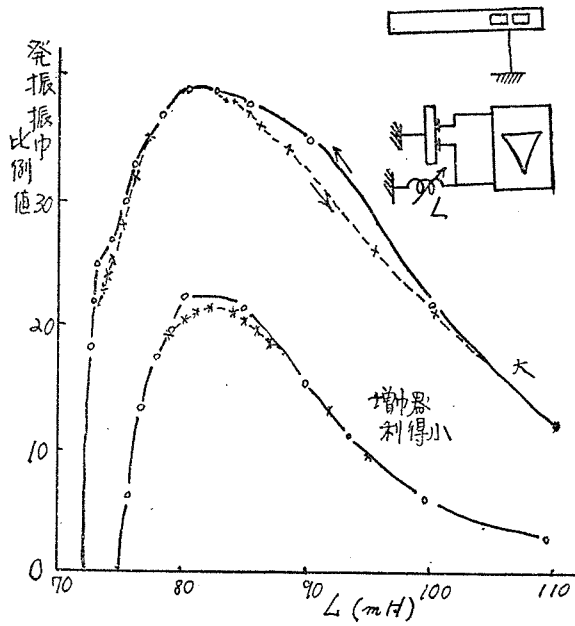


第5.14図 B

第5.15図

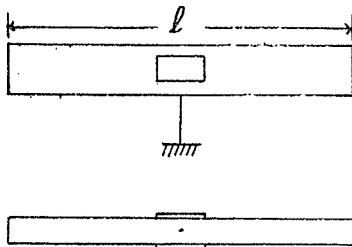


第5.16図



第5.17図

§§ 6 試作チタバリ縦振動音片に関する二三の測定結果について



第6.1図

§ 6.1 チタバリ縦音片の入・出力電圧比について

第6.1図に示す様なチタバリ縦音片について入・出力の電圧比を求め第6.1表の結果を得た。第6.2表は同一試料を圧電駆動及び電磁駆動した場合の比較を示す。Qは整流波を電磁オシロで撮影し算出した。20 KC附近になると電磁駆動が能率悪くチタバリ駆動の方が所要増巾器利得が少なくて済む、この試料は一側面駆動型であるから横振動が起振される。

第6.3表はその一例で素地音片の撓み振動に伴い支

第6.1表

試料	素地音片全長 l(mm)	共振 fo kc	入力電圧/出力電圧	チタバリ寸法	備考
No.1	140	18.6	29.2 db	1×5×10	素地音片鋼製 断面 5×7mm ²
No.2	90	29.0	32	"	
No.3	55	47.3	35	1×4×5	
No.4	40	65.0	37.5	"	

第6.2表

試料	チタバリ駆動	電磁駆動(新型ユニット)	チタバリ音片のQ
No.1, No.1'	29.2 db	66 db	11,000

第6.3表

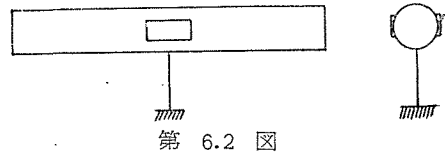
試料	共振fo KC	電圧比	支持鋼針振動姿態	備考
	1.31	27 db		横振動次数 n=1, f1=1.313 KC
No.1	7.05	37.4		n=3, f3=7.06
	16.8	30		n=4, f4=17.5
	18.6	29.2		縦振動次数 N=1, f1=18.6 (λ=5.2×10 ⁵)

持針も図示の様な強制振動を受ける事が観察された。斯く希望しない振動が起振される事は発振器として好ましくないので第6.3図の様に両側面で駆動する方式が良く、また中和インダクタンスを挿入し特定周波数でのみ発振する様にする。

§ 6.2 Tuning Rod 型チタバリ縦音片

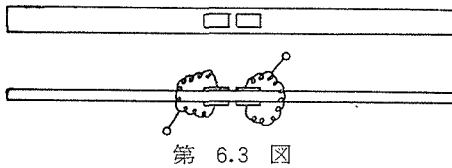
丸棒型の音片は先に精工舎研究部で横振動型音片として使用したが横振動型では直径の不均一が直接共振周波数にも関係しQも少しく低下する等の缺点がある。丸棒型の最大の利点は工作の容易な点と材料の節約の点にありこの利点はむしろ直径の不均一が殆んど周

波数に関係しない縦振動型に於て發揮されるものと考えられる。かゝる見地から第6.4表、第6.2図に示す様な丸棒型チタバリ縦音片を試作し、起振周波数を測定し第6.5表の結果を得た。以上の2実験から明らかな様に一側



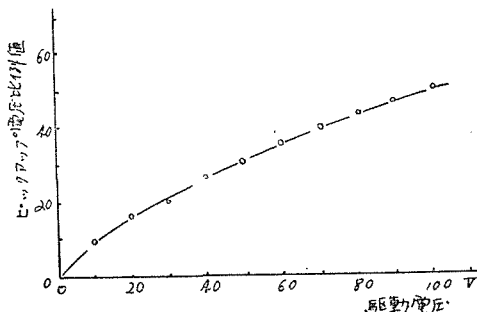
第6.4表

TuningRod全長	114.1mm
〃 径	3.0mm ϕ
支持鋼針長	41mm
〃 径	1.05mm ϕ
チタン酸バリウム	1×3×12



第6.5表

共振周波数	ピックアップ電圧比例値	備考
KC	34	振動次数 n=1 (横)
1.000		
5.43	47	n=3
13.45	30	n=5
20.875	65	N=1 (縦)
23.88	57.6	n=1(振り)
26.7	48	n=7
37.7	60	—
53.0	60	—



第6.4図

面駆動方式では撓み振動が起振されるので第6.3図に示す様に2組4個のBaTiO₃を貼付した角棒型縦音片を試作し一二の測定を試みた。駆動機構から明らかな様にこの場合撓み振動は起振されない。第6.4図は駆動電圧に対するピックアップ電圧(比例値)で入・出力間に線形比例の関係が成立しない。入・出力電圧比は39.5dbで115mHの中和インダクタンス挿入時のそれは18.25dbであった。

§ 6.3 チタバリ縦音片の等価諸定数の測定値

チタバリ音片発振器の解析に當て振動子の等価諸定数値を知る必要がある。副標準振動子として使用する様なチタバリ縦音片では貼付チタバリを小とするから力係数が小さくQが高いため動アドミタンス円の測定は困難となる。本節では大略の値を知る目的から実用以上の大きなチタバリを貼付し測定を容易ならしめ一応の略値を求めてみた。実用に供する様な少量のBaTiO₃を貼付した振動子の測定については水晶の場合を参考にし他の測定法に依る必要がある。試料は素地音片40×50×7 鋼製で、BaTiO₃は10×6×1で第6.3図の構造である。測定算出値を第6.6表に示す。同表の力係数Aは自由端換算値である。

第6.6表

諸 元	諸 値
共振周波数 f_0 Hz	18,500
Q	5,800
C_0 pF	2,200
動アドミタンス径 Y_{mo} ($\mu\Omega$)	5.5
等価質量 m瓦	19.1
等価ステップネス $s \times 10^8 \text{dyne/cm}$	2,580
等価機械抵抗 r dyne/kine	38.3
力係数 A 10^6esu	0.01385
等価インダクタンス L_1 H	9×10^3
等価容量 C_1 F	$7.45 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{1}{9} 10^{-11}\right)$
等価抵抗 R_1 Ω	$2 \cdot 10^{-7} (9 \cdot 10^{11})$

§§ 7 圧電駆動型と電磁駆動型の比較

本章では電磁駆動型音片について二三の考察を行い周波数の増加と共に劣化すると考えられる電磁ユニットの周波数特性及び変換減衰量について説明する。

§7.1 電磁ユニットの周波数特性

交流磁場では磁路のパーミアンス p_0 は複素量と考える必要があるから

$$\dot{p}_0 = p_0 \varepsilon^{-j\beta} \quad \dots\dots (7.1)$$

とおけば力係数及びインダクタンスは夫々

$$\begin{cases} \dot{A} = (2B_0 N \dot{p}_0) \varepsilon^{-j\beta} = A \varepsilon^{-j\beta} , \\ \dot{L} = (4\pi N^2 \dot{p}_0) \varepsilon^{-j\beta} = L \varepsilon^{-j\beta} , \end{cases} \quad \dots\dots\dots (7.2)$$

の様に複素数で表される。^{②①②②} 茲に B_0 は空隙に於ける磁束密度で N

はコイルの巻数、 β は複素導磁率の位相角である。今 \dot{p}_0 が位相のみならずその大きさも周波数により変化するものとし

$$\dot{p}_{0(\omega)} = p_{0(\omega)} \varepsilon^{-j\beta(\omega)} \quad \dots\dots\dots (7.3)$$

とおき之を実験的に確め \dot{A} 及び \dot{L} の周波数特性を定量的に求めてみる。(7.2) 式から

$$\begin{aligned} \dot{L} &= L_1 - jL_2 = L \cos \beta - jL \sin \beta \\ \begin{cases} j\omega \dot{L} &= j\omega L_1 + R \\ R &= \omega L \sin \beta \\ L &= 4\pi N^2 \dot{p}_{0(\omega)} \end{cases} \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (7.4)$$

を得る。

直流抵抗 $R_0 = 480\Omega$ (コイル並列接続) なる旧型ユニットの抵抗及びインダクタンスの周波数に対する測定値は第7.1表のようになるから位相角 β は同表最右端欄の如く求められる。

さて我々は(7.3)式の如く $\dot{p}_{0(\omega)}$ を表示したから、(7.4)式から

$$\frac{L_1}{\cos \beta} = \frac{R/\omega}{\sin \beta} \quad \dots\dots\dots (7.5)$$

なる関係が成立しなければならない。上式の各項は第7.1表から第7.2表の様に求められ略々(7.5)式の等号関係の成立する事が認められる。これは(7.3)式の表示法の妥当な事を意味する。上記の測定結果から

$$\begin{cases} \beta = k_1 f^a \\ (4\pi N^2) \dot{p} = k_2 f^b \end{cases}$$

②① 抜山：電気音響機器の研究(丸善)

②② 小林：電気音響(共立)

②③ 菊地：磁歪振動と超音波(コロナ)

第7.1表 (空隙1mm)

測定周波数 f_{KC}	インダクタンス L (H)	制動抵抗 R_d $K\Omega$	交流抵抗 ($R_o=0.48K\Omega$) $R=R_d-R_o$ $K\Omega$	β_0 度, rad.
0.5	0.18	0.5	0.02	2° (0.0348rad)
1.0	0.16	0.56	0.08	4°32.5' (0.0783)
2.0	0.13	0.72	0.24	8°22' (0.147)
3.0	0.118	0.96	0.48	12°8.5' (0.213)
5.0	0.1	1.54	1.58	18°40' (0.323)
7.0	0.094	2.08	2.64	20°57' (0.366)
10.0	0.082	3.42	4.7	22°47' (0.4)
15.0	0.068	5.18	7.36	36°19' (0.63)
20.0	0.056	7.84	—	45° (0.785)

第7.2表

f_{KC}	$L/\cos\beta$	$R/\omega\sin\beta$
0.5	0.18	0.18
1.0	0.16	0.16
2.0	0.13	0.136
3.0	0.121	0.12
5.0	0.0947	0.08
7.0	0.1	0.1005
10.0	0.089	0.108
15.0	0.0845	0.0845
20.0	0.079	0.083

とおき $f=1KC\sim 10KC$ の各値から上式の係数及び指数を決定すると

$$\begin{cases} \beta = 3.8 \times 10^{-4} f^{0.77} \\ (4\pi N^2)p = 51.9 f^{-0.85} \end{cases} \dots\dots\dots (7.6)$$

の如く与えられる。(7.6)式は $\frac{L}{\cos\beta}$ 及び $\frac{L}{\sin\beta}$ の周波数特性を与える。但し上式は 10KC 以上では不正確となる。

§ 7.2 電磁駆動型音片振動子の動作減衰量

電磁駆動型音片の変換減衰量 B_{em} は

$$B_{em} = \frac{1}{2} \log_e \frac{R_f}{Z_m} = \frac{1}{2} \log_e \left\{ r \frac{R_d}{A^2} + \cos 2\beta \right\} \dots\dots (7.7)$$

第7.3表

f_{KC}	力係数A 10^6 dyne/ob A	$Q/\omega = m/r$	等価質量 m 瓦	B_{em} db
0.5	1.4	4	7.8	1.3
1.0	1.0 ※	2	5.6	3.6
2.0	1.55	1	3.96	10.2
3.0	0.38	0.66	3.24	15.3
5.0	0.26	0.4	2.5	21.6
7.0	0.18	0.28	2.1	26.6
10.0	0.14	0.2	1.75	32
15.0	0.1	0.13	1.4	37.5
20.0	0.077	0.1	1.22	42
備考	※実測値	第7.1図cf	第7.2図cf	

にて表される㊸から、1000 μ 音片についてA, r, R_d , β の諸量を測定しておけば(7.2), (7.4), (7.6)式から B_{em} の周波数特性が算出される。即ち 1000 μ 音片に関する既知データ㊸㊸から第7.3表の様に B_{em} が算出される。但し同表第4欄のmは同一断面(10 \times 2.5)の長さの異なる試料の等価質量で、第3欄

㊸ 近野：音片振動子の機械的等価諸定数値について，山形大学紀要 vo.3, No.1, May 1954

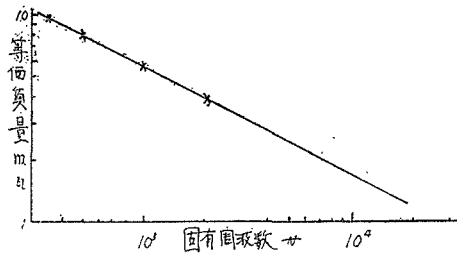
㊸ Nagai & Konno: On Mechanical Vibrator ONPEN as Freq. Standard, SCI.

Rep., R.I.T.U., Dec. 1952.

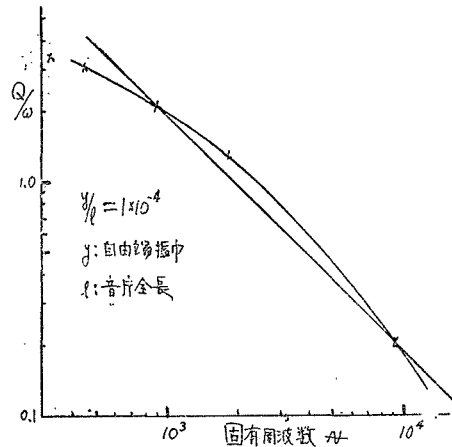
の Q/ω の値も共に第 7.1 図, 第 7.2 図の実験値より得た値である。(7.4)式を用い $R_0 = 4\pi k' N$ とおくと B_{em} は

$$B_{em} = \frac{1}{2} \log_e \left[\pi r \left\{ -\frac{k'}{B_0^2 p_0^2 N} + \frac{\omega \sin \beta}{B_0^2 p_0} \right\} + \cos 2\beta \right] \quad \dots\dots\dots (7.8)$$

の様に書換えられる。これより B_{em} を小ならしめる諸条件が求められるがどれも或制限・限度がある。例えば (i) ターン数 N の増加は漏洩容量の増加をまね



第 7.1 図



第 7.2 図

き ($N \times$ 線径) は構造寸法の上から制限を受ける。(ii) p_0 を大とし β を小とする為には磁性材料, 成層等の改良が考えられるが音片振動子自身が既にブロック状のものであるから高い周波数に於ては磁束が充分滲透せず損をする。(iii) B_0 を大とする事は主も有効であるが音片材料の磁気飽和の点と標準振動子としての周波数安定度の点から制限される。(iv) r を小とする事は音片材料が決まれば定る事で上記 B_0 の大なる程 r_n が大となる。

要するに B_{em} を小とする事は力係数を大とし β を小とする事に相当し結局 s_n が大となり標準振動子としての安定条件と相殺する。濾波器としては活性度の大なる程広帯域となる。

一方圧電駆動型の場合は

$$B_{em} = \frac{1}{2} \log_e \frac{G_f}{A^2} \cdot \Delta_1 = \frac{1}{2} \log_e \frac{G_f}{Y_m} \quad \dots\dots\dots (7.9)$$

となる。然るに $BaTiO_3$ の $\tan \delta$ は $0.5 \sim 4 \times 10^{-2}$ 程度であり電磁駆動の場合の様な渦流損はないから変換減衰量の周波数特性は前者に比し遙かに良い。第 6.1 表, 第 6.2 表はその実証でもある。

結 言

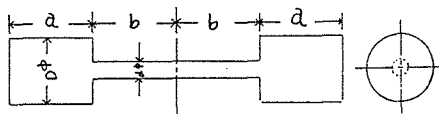
以上チタン酸バリウム駆動縦振動音片について理論的な考察と実験結果について説明を行い圧電振動子としての振動体系を述べ, 特性の向上, 吟味に対する具体的な指針を与えた。発振器, 濾波器としての応用面に関し少しく実験的検証に欠ける処もあるがこれらの諸問題については更に今後の研究に依り補足する計画である。現在の段階に於ては標準振動子としての見地から圧電材料の $BaTiO_3$ の安定度, 特性等の点に少しく心配があり特に実用化に際し経時変化に少しく欠点があると考えられるが, これらの特性の向上と相俟って斯るチタバリ振動子の応用部門は更に拡大するものと考えられる。

終始御懇篤なる御指導を賜っている東北大永井教授に深謝の意を表し、種々御教示を賜った東北大佐藤利三郎、鈴木辰男両助教授並に御援助を賜った当工学部各教官、外田氏、中村尙君に感謝致します。また試料の入手に際し特別なる御厚情を賜った京大阿部・田中教授、東北金属会社、精工舎佐藤氏に深く感謝致します。

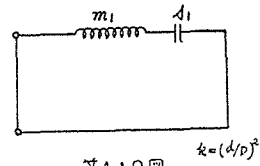
附 録

§ A.1 縦振動変形音片の等価諸定値

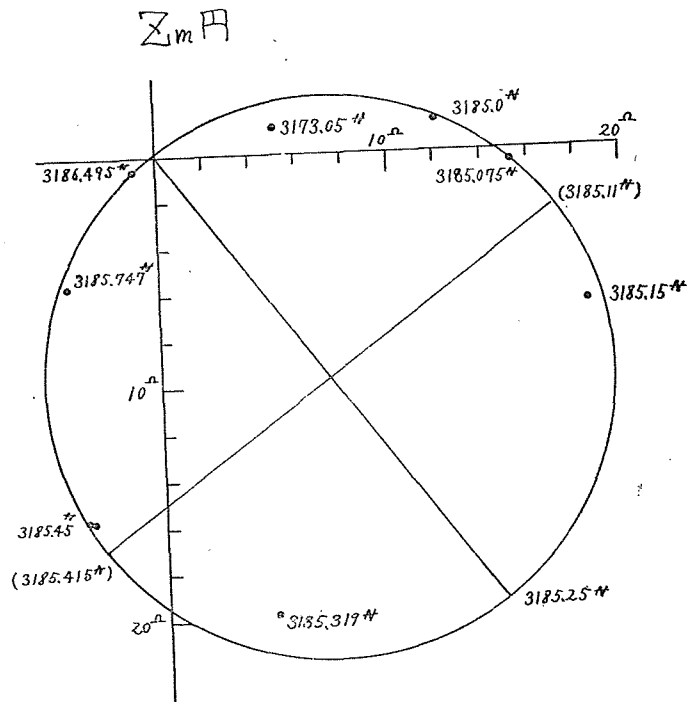
本章では動インピーダンス法による電磁駆動型縦振動変形音片の等価諸定数の測定値につき述べ、先に説明した圧電駆動型との比較資料とする。第A.1.1図に示す様なRod型縦振動変形音片の機械的等価回路は第A.1.2図の様に表される。^{④⑩} 茲に等価定数は



第 A.1.1 図



第A.1.2図



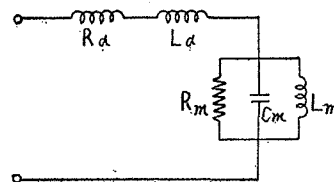
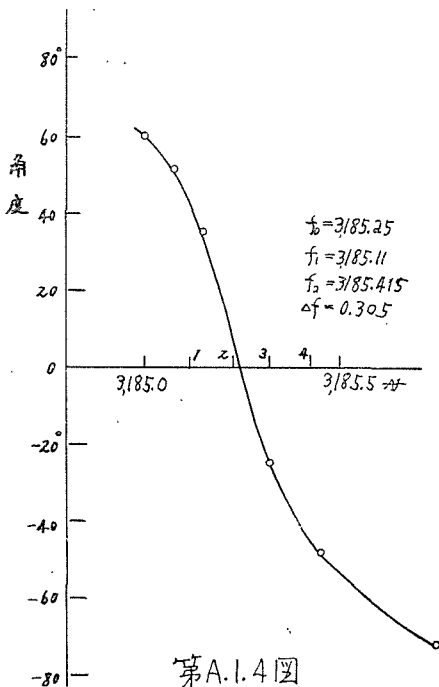
第A.1.3図

$$\begin{cases} m_1 = \frac{M_0}{2} \sigma_1, & s_1 = \omega_0^2 m_1, \\ \sigma_1 = 1 + \frac{b}{a+kb} \cdot \frac{1-k^2}{k} \cdot \sin^2\left(\frac{\omega_0 a}{c_l}\right), \end{cases}$$

にて与えられ, M_0 は振動子の全質量であり $S = \frac{\pi}{4} D^2$, $k = \left(\frac{d}{D}\right)^2$, とすると $M_0 = 2(a+kb)S \cdot \rho$ にて表される。 c_l は伝播速度で σ_1 は等価質量係数である。動インピーダンス円の Quadrantal frequency を夫々 ω_1 , ω_2 としその差を Δ とすると

$$\begin{cases} \Delta = \pi(f_2 - f_1), \\ r = 2m \Delta, \\ A = \sqrt{Z_{m0} r}, \end{cases}$$

なる関係式を得る。但し r は等価抵抗で A は力係数である。



次に測定例を示す。試料は鉄製で寸法は $a=b=5$, $D=2$, $d=0.4$, (cm単位), $k=0.04$ である。

第A.1.3図は測定動インピーダンスで第A.1.4図は周波数に対する位相角を示す。之より

$$Z_{m0} = 24 \sqrt{-60^\circ} \Omega = 24 \times 10^9 \sqrt{-60^\circ} \text{ ab}\Omega$$

$$f_{01} = 3,185.25 \text{ ㄹ}, \quad f_1 = 3,185.11 \text{ ㄹ}, \quad f_2 = 3,185.415 \text{ ㄹ}$$

$$\delta f = f_2 - f_1 = 0.305$$

を得るから諸定数は第A.1.1表に示す様な値となる。

猶 Z_d , Z_n は第A.1.5図の各素子に相当する。

第A.1.1表

$A = 2.48 \times 10^6 \sqrt{-30^\circ} \text{ dyne/abA},$ $r = 255 \text{ dyne/kine},$ $Q = 10,500$ $s_t = 5.3 \times 10^{10} \text{ dyne/cm}$ $m_t = 133 \text{ ㄹ} \left(= \sigma_m \frac{M_0}{2} \right)$ $M_0 = 255 \text{ ㄹ} \text{ (計算値 } \rho = 7.8)$ $256 \text{ ㄹ} \text{ (測定値天秤)}$ $\sigma_m = 1.04$ $\triangle = 0.958$	$R_m = A^2/r_t = 2.41 \times 10^{10} \text{ ab}\Omega = 24.1 \Omega$ $ C_m = m_t/A^2 = 0.216 \times 10^{10} \text{ abF} = 0.0216 \text{ F},$ $ L_m = A^2/s_t = 1.16 \times 10^2 \text{ abH} = 1.16 \times 10^{-4} \text{ mH},$ $R_d = 185 \Omega$ $L_d = 8.35 \text{ mH}$ $s_m = \frac{A}{L_d} A \cos \beta = 0.712 \times 10^2 \text{ dyne/cm},$ $r_n = \frac{A}{\omega L_d} A \sin \beta = 13.3 \text{ dyne/kine},$
--	---

On Mechanical Vibrator excited electrostrictively by BaTiO₃ Ceramics

Masashi Konno

Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering

This is a report of some theoretical and experimental results on the mechanical vibrators, which are excited electrostrictively by BaTiO₃ Ceramics and vibrate longitudinally to its long axis. Such vibrator is useful as a standard vibrator and a mechanical filter element.